

Modellbasierte Sensitivitätsanalyse systembestimmender Faktoren eines Grubenwasser-
anstiegs in Untertagebergwerken mittels statistischer Versuchsplanung

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

M.Sc. (Geowiss.) Sebastian Westermann

aus Rheda-Wiedenbrück

genehmigt von der Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften
der Technischen Universität Clausthal,

Tag der mündlichen Prüfung

9. Juli 2020

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie; detailed bibliographic data are available in the internet at <http://dnb.dnb.de>.

Dekan:	Prof. Dr. rer. nat. Bernd Lehmann
Vorsitzender der Promotionskommission:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Norbert Meyer
Erstgutachter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Oliver Langefeld
Zweitgutachter:	Prof. Dr. rer. nat. Christian Melchers

Dissertation Technische Universität Clausthal 2020

D 104

© **PAPIERFLIEGER VERLAG** GmbH, Clausthal-Zellerfeld, 2020
Telemannstraße 1 • 38678 Clausthal-Zellerfeld
www.papierflieger.eu

Urheberrechtlich geschützt, alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Wege (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2020

ISBN 978-3-86948-772-4

Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unerlaubte Hilfen ausgeführt und verfasst wurde. Ich habe alle Fakten, Textstellen und Abbildungen, die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, durch entsprechende Zitate gekennzeichnet. Die vorliegende Dissertation wurde in dieser oder ähnlicher Form bei keiner Fakultät, weder dieser noch einer anderen Hochschule, eingereicht.

Hövelhof, der 04.09.2020

Sebastian Westermann

„Weisheit eines Menschen misst man nicht nach seinen Erfahrungen,
sondern nach seiner Fähigkeit, Erfahrungen zu machen.“

George Bernard Shaw (1856 – 1950), irischer Dramatiker

„Formeln sind nur Werkzeuge,
die den Verstand lenken sollen und diesen niemals ersetzen können.“

Arsène Jules-Étienne Juvénal Dupuit (1804 – 1866)

Kurzfassung

Eine Auswertung abgeschlossener Grubenwasseranstiege in Untertagebergwerken ergibt ein Bild verschiedener Anstiegsszenarien. Der Grund dafür ist die Komplexität der Bergwerksgeometrie und der standortspezifischen hydrogeologischen Gebirgseigenschaften. Im Rahmen dieser Dissertation wird ein Code auf Basis analytischer Methoden der Grundwasserdynamik entwickelt, mit welchem der Grubenwasseranstieg sowie die Zuflussrate in hydraulisch isolierten Untertagebergwerken modelliert werden kann. Das analytische Modell zeichnet sich durch vereinfachte Annahmen eines Untertagebergwerks aus. Gegenüber numerischen Grund- und Grubenwasserströmungsmodelle ist eine detaillierte Kenntnis über die räumliche Verteilung der natürlichen und anthropogenen Faktoren nicht erforderlich.

Die Arbeit beschreibt den Aufbau und die Anwendung dieses analytischen Modells, um die Signifikanz ausgewählter natürlicher und anthropogener Faktoren zu untersuchen, die den Anstieg des Grubenwassers beeinflussen. Zu den untersuchten Faktoren zählen der Durchlässigkeitskoeffizient, das bergmännisch geschaffene Resthohlraumvolumen, die Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs für das Grubenwasser sowie die flächenspezifische vertikale Infiltrationsspende. Als Untersuchungsgebiete dienen die drei Steinkohlenbergwerke Ibbenbüren, Königsborn (Unna) und Westfalen (Ahlen), die sich hinsichtlich des geologischen Aufbaus voneinander unterscheiden.

Diese Arbeit belegt eine erstmalige Anwendung der statistischen Versuchsplanung (Design of Experiments) im Bereich der speziellen Hydrogeologie im (Nach-)Bergbau. Das Ursache-Wirkungs-Modell wird mathematisch durch ein nicht-lineares, multiples Beschreibungsmodell (Regressionsgleichung) dargestellt. Diese beschreibt den funktionalen Zusammenhang zwischen der Variation der Faktoren und deren Auswirkung auf die Abweichung der Grubenwasser(druck)fläche. Hohe statistische Kennzahlen (R^2 , Q^2) bestätigen die gute Modellgüte.

Die faktorspezifischen Wirkstärken werden anhand der partiellen Ableitung des Beschreibungsmodells und der Integration der Ergebnisse über den Vertrauensbereich der Faktoren bestimmt. Das Ergebnis zeigt, dass die Wirkstärken den Regressionskoeffizienten der linearen Terme der jeweiligen Faktoren entsprechen. Die standortspezifischen Wirkstärken zeigen im Vergleich mit dimensionslosen Lagerstättencharakteristika plausible Abhängigkeiten. Durch Normierung lassen sich die Wirkstärken verallgemeinern und vergleichen. Dadurch können lagerstättenabhängige Prioritätenklassen gebildet werden. Die Ergebnisse leisten einen zentralen Beitrag für ein vertieftes Prozess- und Systemverständnis. Dadurch können Monitoringmaßnahmen entsprechend der systembestimmenden Faktoren gestaltet und optimiert werden.

Abstract

An evaluation of several completed mine water rebounds has resulted in different rise scenarios due to the complexity of the geometry of the mine workings and the pertinent hydrogeological properties of the local strata. During this dissertation project, a code has been developed which is based on analytical methods of groundwater dynamics and allows for a modelling of mine water rebounds and the influx rate in hydraulically isolated underground mine workings. This analytical model is characterised by applying a simplified concept of an underground mine. Contrary to numeric flow models for both groundwater and mine water movements, no detailed knowledge of the spatial distribution of the natural and anthropogenic factors is required.

This dissertation describes the design and application of this analytical model to examine the relevance of selected natural and anthropogenic factors which influence the mine water rebound. The factors examined include the conductivity coefficient, the void volumes created by mining, the scale of area hydraulically affected by the mine water (depression range), and the vertical infiltration contribution specific to the area. These examinations are carried out at the collieries Ibbenbüren, Königsborn (Unna) and Westfalen (Ahlen) because they all differ in their geological structure.

This thesis provides evidence of a successful application of Design of Experiments (DoE) regarding aspects of hydrogeology and (post)mining. The cause-and-effect model is described by a non-linear multiple model (regression equation). This describes the functional connection between the variation of the factors and the effect they have on the deviation of the mine water (pressure) level. A high number of statistical indicators (R^2 , Q^2) confirms a high quality of the model.

The effects (sensitivity coefficients) of different factors are defined by means of a partial derivation of the model and the integration of the results via the confidence interval of the factors (mean value theorem for integrals). The result shows that the sensitivity coefficients correspond with the regression coefficient of the linear terms of the individual factors. The location-specific sensitivity coefficients show plausible dependencies compared to non-dimensional deposit characteristics.

A standardisation allows to generalise the sensitivity coefficients and to compare them. By doing so, the factors can be categorised into priority classes which depend on the deposits. These results contribute to an in-depth understanding of processes and systems; they also help to optimise monitoring measures by placing the monitoring focus on those factors which dominate the system.

Danksagung

Diese Dissertation entstand im Rahmen einer kooperativen Promotion am Institut für Bergbau der Technischen Universität Clausthal sowie am Forschungszentrum Nachbergbau der Technischen Hochschule Georg Agricola Bochum. Herr Prof. Dr.-Ing. Oliver Langefeld und Herr Prof. Dr. rer. nat. Christian Melchers haben die Begutachtung meiner Dissertation übernommen. Dafür möchte ich mich recht herzlich bei Ihnen bedanken.

Besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Dmitry V. Rudakov (Dnipro University of Technology [Ukraine]). Er stellte mir unermüdlich seine Zeit und sein Wissen zur Verfügung. Ohne seine Anregungen, den hilfreichen Diskussionen (trotz der großen Entfernung) und vor allem ohne die softwaretechnische Umsetzung des analytischen Modells wäre diese Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. Christian Wolkersdorfer (Tshwane University of Technology [Südafrika]) danke ich, dass er mir auch an den entlegensten Orten während der Promotionszeit Einblicke in eine Vielzahl an interessanten Themenbereiche gab, die zu wichtigen Bestandteilen meiner Dissertation wurden.

Ich möchte mich auch bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. Wilhelm G. Coldewey bedanken, der mir nicht erst seit der Promotion das Wissen der Hydrogeologie auf eine faszinierende Weise vermittelt. Ich freue mich noch auf viele weitere „Lehrjahre“ bei Ihnen.

In einer entscheidenden Zeit half mir Herr Dr. rer. nat. Christoph Fredebeul (Max-Born-Berufskolleg Recklinghausen), das erforderliche Verständnis für die (für mich) komplexe Mathematik zu entwickeln.

Ich danke den Kolleginnen und Kollegen des Forschungszentrums Nachbergbau. Vor allem gebührt meinen Kollegen Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Goerke-Mallet und Herrn Dr.-Ing. Stefan Möllerherm großer Dank für ihre Bereitschaft, jederzeit mit mir über die unterschiedlichsten Sachverhalte zu diskutieren. Besonderer Dank gilt meinem Kollegen Herrn Dr. rer. nat. Bastian Reker, der mir vor allem dabei half, meine Gedanken in anschauliche Abbildungen zu überführen. Eine sehr große Unterstützung war auch meine studentische Hilfskraft Frau B. Sc. cand. Britta Engbring, die eine Vielzahl von (oftmals sicherlich nicht so erfreulichen) Aufgaben übernahm und stets zur vollsten Zufriedenheit erledigte.

Mein Vater Johannes sorgte mit seinem mehrfachen Korrekturlesen dafür, dass meine oftmals komplizierte Ausdrucksweise ein Stück verständlicher wurde. Ich danke dir, dass du nicht kapituliert hast. Auch der vermeintliche Leser dieser Dissertation wird dir dafür dankbar sein.

Den größten Dank gebührt aber meiner Familie. Meine Frau Mareike sowie unsere beiden Söhne Ole und Ben mussten vor allem in den letzten Monaten der Promotionszeit auf mich verzichten. Ihre verständnisvolle Rücksichtnahme auf meine Belange in dieser Zeit war unschätzbar wichtig.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Einführung.....	1
1.2	Problembeschreibung und Ziele der Arbeit.....	4
1.3	Kenntnisstand.....	5
1.3.1	Grubenwasseranstiegsprozess in Untertagebergwerken.....	5
1.3.2	Modellierung eines Grubenwasseranstiegs.....	7
1.3.3	Statistische Versuchsplanung (Design of Experiments).....	8
1.4	Begriffsbestimmungen.....	11
1.4.1	Wassertypen.....	11
1.4.2	Grubenwasseranstieg, Flutung.....	13
1.4.3	Statistische Versuchsplanung.....	13
2	Methodik.....	15
2.1	Arbeitsvorbereitung.....	15
2.1.1	Auswahl der Untersuchungsgebiete.....	15
2.1.2	Festlegung des Untersuchungsumfanges.....	15
2.1.3	Datenerhebung und -grundlage.....	16
2.2	Bestimmung der Wertespannbreiten.....	16
2.3	Analytisches Modell.....	17
2.4	Sensitivitätsanalyse.....	17
2.4.1	Bestimmung der Abweichung zwischen den Zeitreihen der berechneten und gemessenen Daten.....	17
2.4.2	Partielle Differentialrechnung.....	18
3	Grundlagen der statistischen Versuchsplanung.....	21
3.1	Verwendete Software.....	21
3.2	Versuchsplanung.....	21
3.2.1	Auswahl der experimentellen Zielsetzung.....	21
3.2.2	Definition der Faktoren.....	22
3.2.3	Definition der Effekte.....	22
3.2.4	Auswahl eines Versuchsplans.....	22
3.2.5	Signifikanzbewertung.....	25

3.3	Statistische Bewertung eines Beschreibungsmodells.....	26
3.3.1	Darstellung der Verteilung.....	26
3.3.2	Darstellung der Koeffizienten.....	28
3.3.3	Multiple Regression (Beschreibungsmodell)	28
3.3.4	Statistische Kenndaten	29
4	Einflussfaktoren eines Grubenwasseranstiegs.....	30
4.1	Grund- und Grubenwasserbewegung im Steinkohlenbergwerk	30
4.1.1	Wasserströmung im Gebirge	30
4.1.2	Wasserströmung im Grubengebäude	32
4.1.3	Räumlich-zeitlicher Verlauf des Grubenwasseranstiegs	33
4.1.4	Mathematische Funktion der idealisierten Grubenwasseranstiegskurve.....	35
4.2	Natürliche Faktoren.....	36
4.2.1	Allgemeines	36
4.2.2	Hydraulische Gesteins- und Gebirgsdurchlässigkeit.....	37
4.2.3	Volumina der Poren und Trennflächen.....	41
4.2.4	Wasserzuflussraten	42
4.2.5	Grundwasserneubildung.....	48
4.2.6	Mächtigkeit und lithologische Ausbildung des Deckgebirges.....	49
4.2.7	Nachbergbaulicher Wasserstand	50
4.2.8	Grundwasserstände in der Umgebung des Grubengebäudes	51
4.3	Anthropogene Faktoren	51
4.3.1	Allgemeines	51
4.3.2	Bergbaulich geschaffenes Hohlraumvolumen.....	52
4.3.3	Hydraulische Durchlässigkeit des Grubengebäudes.....	56
4.3.4	Gezielte Steuerungsmaßnahmen des Grubenwasseranstiegs.....	57
4.3.5	Hydraulisch wirksamer Einflussbereich	58
5	Beschreibung der Untersuchungsgebiete	62
5.1	Untersuchungsgebiete	62
5.2	Geologischer und hydrogeologischer Überblick.....	62
5.3	Bergwerk Ibbenbüren.....	64
5.3.1	Geographie, Geologie und Hydrogeologie	64
5.3.2	Bergbau und bergmännische Wasserwirtschaft	65

5.3.3	Grubenwasseranstiegsverlauf	66
5.3.3.1	Planung und Konzept des Grubenwasseranstiegs	66
5.3.3.2	Beschreibung des tatsächlichen Grubenwasseranstiegsverlaufs.....	68
5.3.3.3	Grubenwasseranstiegsrelevante Kenndaten	69
5.4	Bergwerk Königsborn	70
5.4.1	Geographie, Geologie und Hydrogeologie	70
5.4.2	Bergbau und bergmännische Wasserwirtschaft.....	72
5.4.3	Grubenwasseranstiegsverlauf	72
5.4.3.1	Planung und Konzept des Grubenwasseranstiegs	72
5.4.3.2	Beschreibung des tatsächlichen Grubenwasseranstiegsverlaufes...	73
5.4.3.3	Grubenwasseranstiegsrelevante Kenndaten	74
5.5	Bergwerk Westfalen	76
5.5.1	Geographie, Geologie und Hydrogeologie	76
5.5.2	Bergbau und bergmännische Wasserwirtschaft.....	78
5.5.3	Grubenwasseranstiegsverlauf	78
5.5.3.1	Planung und Konzept des Grubenwasseranstiegs	78
5.5.3.2	Beschreibung des tatsächlichen Grubenwasseranstiegsverlaufes...	79
5.5.3.3	Grubenwasseranstiegsrelevante Kenndaten	80
6	Modellierung des Grubenwasseranstiegs mittels des analytischen Modells.....	82
6.1	Begründung und Zielsetzung	82
6.2	Modellaufbau und Modellannahmen.....	83
6.3	Verwendete hydrogeologische Gleichungen	84
6.4	Ermittlung der Modelleingangsdaten.....	91
6.4.1	Allgemeines.....	91
6.4.2	Durchlässigkeitskoeffizient.....	91
6.4.3	Flächenspezifische vertikale Infiltrationsspende	95
6.4.4	Bergmännisch geschaffenes Resthohlraumvolumen	99
6.4.5	Hydraulisch wirksamer Einflussbereich	102
6.5	Vorgehensweise bei der Modellierung	106
6.6	Variantenrechnung	108

7	Ergebnisse.....	112
7.1	Modellierung.....	112
7.1.1	Bergwerk Ibbenbüren.....	112
7.1.2	Bergwerk Königsborn.....	115
7.1.3	Bergwerk Westfalen.....	117
7.1.4	Bewertung der Modellergebnisse.....	119
7.1.5	Bewertung der Zuflussrate als Ergebnis der Modellierung.....	121
7.2	Faktor- und termspezifische Wirkstärken.....	122
7.2.1	Allgemeines.....	122
7.2.2	Signifikanzbewertung der Terme.....	123
7.2.3	Statistische Kenndaten zur Beschreibung der Modellgüte.....	124
7.2.4	Ergebnisse zu den Wirkstärken der Faktoren und Termen.....	127
7.2.4.1	Bergwerk Ibbenbüren.....	127
7.2.4.2	Bergwerk Königsborn.....	129
7.2.4.3	Bergwerk Westfalen.....	130
7.2.5	Mathematische Begründung der Wirkstärken.....	132
7.2.5.1	Zielsetzung.....	132
7.2.5.2	Multiple Regression.....	132
7.2.5.3	Partielle Differentialrechnung.....	133
7.2.5.4	Bergwerk Ibbenbüren.....	135
7.2.5.5	Bergwerk Königsborn.....	139
7.2.5.6	Bergwerk Westfalen.....	142
8	Bewertung und Diskussion der Ergebnisse.....	145
9	Zusammenfassung.....	159
10	Literatur- und Quellenverzeichnis.....	162
11	Anhänge.....	178

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Steinkohlenvorkommen in Europa (in Klammern: Jahr der endgültigen Stilllegung; verändert nach WESTERMANN et al. 2018).	1
Abbildung 2:	Grubenwasseranstiege in ehemaligen europäischen Steinkohlenrevieren (MELCHERS et al. 2019).	3
Abbildung 3:	Prinzip der statistischen Versuchsplanung.	9
Abbildung 4:	Vierdimensionales Koordinatensystem.	19
Abbildung 5:	Auswahlmöglichkeiten von Versuchsplänen und Beschreibungsmodellen (Ausschnitt aus der verwendeten Statistiksoftware MODDE Pro 12.1).	23
Abbildung 6:	Vergleich eines signifikanten und nicht-signifikanten Terms.	26
Abbildung 7:	Darstellungsmöglichkeit der Variabilität der Effekte (Ausschnitt aus der verwendeten Statistiksoftware MODDE Pro 12.1).	27
Abbildung 8:	Darstellungsmöglichkeit der Koeffizienten (Ausschnitt aus der verwendeten Statistiksoftware MODDE Pro 12.1).	27
Abbildung 9:	Idealisierte Kurve eines Grubenwasseranstiegs mit Phaseneinteilung (verändert nach MELCHERS et al. 2019).	33
Abbildung 10:	Gemessene und mittels der Sättigungsfunktion modellierte Grubenwasseranstiege der Bergwerke Königsborn (Ruhrgebiet) und Easington (Durham [UK]).	36
Abbildung 11:	Hohlräume im Untergrund.	41
Abbildung 12:	Aufteilung der Zuflüsse in ein Grubengebäude.	43
Abbildung 13:	Veranschaulichung der Leckagesituation in einem Untertagebergwerk.	44
Abbildung 14:	Beispiel zur Darstellung der Entwicklung des Grubenwasseranstiegs, der Zuflussrate und der Überlaufrate; modelliert mit dem Mine Water Filling Model (verändert nach BANKS 2001).	47
Abbildung 15:	Veränderung des Absenkungsfaktors zur Berechnung stark durchbauter Abbaubereiche in Abhängigkeit von der Abbauteufe und der Versatzart (verändert nach ECKART & RÜTERKAMP 2016).	53
Abbildung 16:	Abflussrate des Dickenberger Stollens zur Entwässerung des Abbaubereichs „Westfeld“ des Bergwerks Ibbenbüren für den Zeitraum von 1979 bis 2017.	66

Abbildung 17:	Vergleich des Grubenwasseranstiegs im Abbaubereich „Westfeld“ des Bergwerks Ibbenbüren mit dem Modellergebnis der DMT GMBH & Co. KG.	68
Abbildung 18:	Berechtsame, Schachtstandorte und Großtektonik des Bergwerks Königsborn (verändert nach HEITFELD et al. 2012).	71
Abbildung 19:	Schichtenverzeichnis des Schachts Königsborn 4 (nach CLOSTERMANN et al. 1997).	71
Abbildung 20:	Grubenwasseranstieg im Bergwerk Königsborn sowie auf ein Jahr hochgerechnete Grubenwasseranstiegsraten.	73
Abbildung 21:	Vertikale Verteilung der Durchlässigkeitskoeffizienten auf Basis des Schichtenverzeichnisses des Schachts Königsborn 4 (Daten: RAG AG).	75
Abbildung 22:	Berechtsame, Schachtstandorte und Großtektonik des Bergwerks Westfalen (verändert nach ANGRICK 1999).	76
Abbildung 23:	Schichtenverzeichnis des Schachts Westfalen 7 (nach RÜTERKAMP et al. 2000).	77
Abbildung 24:	Grubenwasseranstieg im Schacht Westfalen 7 sowie auf ein Jahr hochgerechnete Grubenwasseranstiegsraten.	79
Abbildung 25:	Teufenspezifische Verteilung des Resthohlraumvolumens im Bergwerk Westfalen (Daten: RAG AG).	81
Abbildung 26:	Schematischer Profilschnitt zur Erläuterung der konzeptionellen Modellvorstellung (verändert nach WESTERMANN et al. 2018).	84
Abbildung 27:	Schematische Darstellung zur Erläuterung der Berechnung der Abflussrate in Richtung eines entwässerten Bergwerks.	89
Abbildung 28:	Schematische Darstellung zur Erläuterung der Ermittlung der Zuflussrate über die Schichten des Turoniums und Cenomaniums in das Bergwerk.	97
Abbildung 29:	Überführung der „tatsächlichen“ Umhüllenden der Abbauflächen und des Absenkungstrichters in eine idealisierte rotationssymmetrische Form mit gleicher Flächengröße.	103
Abbildung 30:	Profilschnitt und die daraus resultierende horizontale Projektion vertikal übereinander liegender Abbaubereiche sowie der Absenkungstrichter.	104
Abbildung 31:	Ansätze für die Reichweiten des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs.	105
Abbildung 32:	Visualisierung der Eingabeparameter (Ausschnitt aus Delphi).	107

Abbildung 33:	Abhängigkeit der relativen Abweichung zwischen den Zeitreihen der berechneten und gemessenen Grubenwasser(druck)fläche von der Höhe der Faktorvariation am Beispiel des Bergwerks Ibbenbüren (Abbaubereich „Westfeld“).	109
Abbildung 34:	Modellkurven der Grubenwasser(druck)fläche für das Bergwerk Ibbenbüren (Abbaubereich „Westfeld“).	113
Abbildung 35:	Verteilung der relativen Abweichungen zwischen den Zeitreihen der berechneten und gemessenen Grubenwasser(druck)fläche und der Zuflussrate für das Bergwerk Ibbenbüren (Abbaubereich „Westfeld“).	114
Abbildung 36:	Modellkurven der Grubenwasser(druck)fläche für das Bergwerk Königsborn.	115
Abbildung 37:	Verteilung der relativen Abweichungen zwischen den Zeitreihen der berechneten und gemessenen Grubenwasser(druck)fläche und der Zuflussrate für das Bergwerk Königsborn.	116
Abbildung 38:	Modellkurven der Grubenwasser(druck)fläche für das Bergwerk Westfalen.	117
Abbildung 39:	Verteilung der relativen Abweichungen zwischen den Zeitreihen der berechneten und gemessenen Grubenwasser(druck)fläche und der Zuflussrate für das Bergwerk Westfalen.	118
Abbildung 40:	Vergleich der mittleren relativen Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen Zeitreihen der Grubenwasser(druck)fläche und der Zuflussrate in Abhängigkeit von dem Verhältnis zwischen der Deckgebirgsmächtigkeit und der Gesamtteufe des Untertagebergwerks.	120
Abbildung 41:	Datengrundlage der Entwicklung der Zuflussrate am Beispiel des Bergwerks Königsborn.	122
Abbildung 42:	Veränderung der statistischen Kennzahlen (R^2 , Q^2 , $[R^2 - Q^2]$) durch Anpassung des statistischen Versuchsplans.	126
Abbildung 43:	Tornadodiagramm mit den Wirkstärken auf die Abweichung zwischen der berechneten und gemessenen Grubenwasser(druck)fläche für das Bergwerk Ibbenbüren (Abbaubereich „Westfeld“).	128
Abbildung 44:	Tornadodiagramm mit den Wirkstärken auf die Abweichung zwischen der berechneten und gemessenen Grubenwasser(druck)fläche für das Bergwerk Königsborn.	129
Abbildung 45:	Tornadodiagramm mit den Wirkstärken auf die Abweichung zwischen der berechneten und gemessenen Grubenwasser(druck)fläche für das Bergwerk Westfalen.	131

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 46:	Graphische Darstellung der partiellen Ableitungsfunktionen innerhalb des Vertrauensbereichs $-0,1 < \check{X}_n < 0,1$ für das Bergwerk Ibbenbüren (Abbaubereich „Westfeld“).	136
Abbildung 47:	Graphische Darstellung der partiellen Ableitungsfunktionen innerhalb des Vertrauensbereichs $-0,1 < \check{X}_n < 0,1$ für das Bergwerk Königsborn.	139
Abbildung 48:	Graphische Darstellung der partiellen Ableitungsfunktionen innerhalb des Vertrauensbereichs $-0,1 < \check{X}_n < 0,1$ für das Bergwerk Westfalen.	142
Abbildung 49:	Wirkstärken in Abhängigkeit von dem Verhältnis zwischen der Deckgebirgsmächtigkeit und der Gesamtteufe eines Untertagebergwerks.	150
Abbildung 50:	Wirkstärken in Abhängigkeit von dem Verhältnis zwischen der vertikalen und horizontalen Zuflussrate.	153

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Erläuterung der Formelzeichen.	XX
Tabelle 2:	Ausgewählte, frei zugängliche Literatur zu Grubenwasseranstiegen in ehemaligen deutschen Steinkohlenrevieren.	6
Tabelle 3:	Verwendete Messdaten.	16
Tabelle 4:	Versuchspläne für bis zu vier Faktoren.	24
Tabelle 5:	Phaseneinteilung eines Grubenwasseranstiegs nach qualitativen Kriterien.	34
Tabelle 6:	Einteilung der Durchlässigkeitskoeffizienten nach DIN 18130-1 (1998).	38
Tabelle 7:	Geohydraulische Kenndaten für ausgewählte Deckgebirgsschichten der Rheinisch-Westfälischen Steinkohlenlagerstätte (verändert nach BALTES et al. 1998).	39
Tabelle 8:	Durchlässigkeitskoeffizienten für die Emscher-Formation (verändert nach WENDLAND et al. 2002).	39
Tabelle 9:	Geohydraulische Kenndaten für ausgewählte Schichten des Oberkarbons der Rheinisch-Westfälischen Steinkohlenlagerstätte (verändert nach BALTES et al. 1998).	40
Tabelle 10:	Größenordnungen für den Gesamtporenanteil und speichernutzbare (effektive) Porosität für Lockergesteine (nach GARLING & DITTRICH 1979).	42
Tabelle 11:	Vergleich ausgewählter flächenspezifischer Zuflussspenden (ECKART et al. 2015).	43
Tabelle 12:	Dichten typischer Gesteine des Oberkarbons ([1] SCHUMANN 2016; [2] HOCHLEITNER 2009).	56
Tabelle 13:	Vergleich der ermittelten Absenkungreichweiten unter Zugrundelegung direkter Verfahren.	60
Tabelle 14:	Vergleich der ermittelten Absenkungreichweiten unter Zugrundelegung iterativer Verfahren.	61
Tabelle 15:	Kenndaten des Grubenwasseranstiegs im Bergwerks Ibbenbüren (Abbaubereich „Westfeld“).	69
Tabelle 16:	Kenndaten des Grubenwasseranstiegs im Bergwerk Königsborn.	74
Tabelle 17:	Kenndaten des Grubenwasseranstiegs im Bergwerk Westfalen.	80
Tabelle 18:	Wertespannbreiten für die Durchlässigkeitskoeffizienten ([1] aus WENDLAND et al. 2002; [2] aus BALTES et al. 1998).	92
Tabelle 19:	Teufenlagen der Streckenanschlüsse an den Schächten.	93

Tabelle 20:	Wertespannbreiten der (gewichteten) Durchlässigkeitskoeffizienten der Bergwerke Ibbenbüren (Abbaubereich „Westfeld“), Königsborn und Westfalen.	95
Tabelle 21:	Wertespannbreiten der Infiltrationsspenden des Bergwerks Ibbenbüren (Abbaubereich „Westfeld“).	96
Tabelle 22:	Wertespannbreiten der Infiltrationsspenden, die den Bergwerken Westfalen und Königsborn über die Schichten des Turoniums und Cenomaniums zufließen.	99
Tabelle 23:	Dokumentierte Resthohlraumvolumina des Bergwerks Westfalen nach verschiedenen Autoren und Quellen.	100
Tabelle 24:	Dokumentierte Resthohlraumvolumen des Bergwerks Königsborn nach verschiedenen Autoren und Quellen.	100
Tabelle 25:	Resthohlraumvolumina der Bergwerke Westfalen, Königsborn und Ibbenbüren (Abbaubereich „Westfeld“; Datenquelle: Bergwerke Westfalen und Königsborn: RAG AG. Bergwerk Ibbenbüren: KORIES et al. 2017a).	101
Tabelle 26:	Wertespannbreiten der Resthohlraumvolumina der Bergwerke Westfalen, Königsborn und Ibbenbüren (Abbaubereich „Westfeld“).	102
Tabelle 27:	Vergleich der Ergebnisse der jeweiligen Gleichungen zur Abschätzung der Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs.	104
Tabelle 28:	Wertespannbreiten der Reichweiten des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs der Bergwerke Westfalen, Königsborn und Ibbenbüren (Abbaubereich „Westfeld“).	106
Tabelle 29:	Recherchierte bzw. rechnerisch ermittelte Wertespannbreiten sowie modelltechnisch untersuchte Spannbreite der Faktoren für das Bergwerk Ibbenbüren (Abbaubereich „Westfeld“).	109
Tabelle 30:	Recherchierte bzw. rechnerisch ermittelte Wertespannbreiten sowie modelltechnisch untersuchte Spannbreite der Faktoren für das Bergwerk Königsborn.	110
Tabelle 31:	Recherchierte bzw. rechnerisch ermittelte Wertespannbreiten sowie modelltechnisch untersuchte Spannbreite der Faktoren für das Bergwerk Westfalen.	110
Tabelle 32:	Anzahl der Messungen der Grubenwasser(druck)fläche und der Zuflussrate je Bergwerk.	112
Tabelle 33:	Für die Auswertung ausgeschlossene nicht-signifikante Terme.	123
Tabelle 34:	Statistische Kenndaten des Beschreibungsmodells für das Bergwerk Ibbenbüren (Abbaubereich „Westfeld“).	125
Tabelle 35:	Statistische Kenndaten des Beschreibungsmodells für das Bergwerk Königsborn.	125

Tabelle 36:	Statistische Kenndaten des Beschreibungsmodells für das Bergwerk Westfalen.	125
Tabelle 37:	Prozentuale Veränderung der statistischen Kenndaten (R^2 - und Q^2 -Wert) durch Anpassungen des statistischen Versuchsplans.	126
Tabelle 38:	Gegenüberstellung der Regressionskoeffizienten („Wirkstärken“) der linearen Terme und der Ergebnisse der Mittelwert-sätze der Integralrechnung für die untersuchten Faktoren des Bergwerks Ibbenbüren (Abbaubereich „Westfeld“).	138
Tabelle 39:	Gegenüberstellung der Regressionskoeffizienten („Wirkstärken“) der linearen Terme und der Ergebnisse der Mittelwert-sätze der Integralrechnung für die untersuchten Faktoren des Bergwerks Königsborn.	141
Tabelle 40:	Gegenüberstellung der Regressionskoeffizienten („Wirkstärken“) der linearen Terme und der Ergebnisse der Mittelwert-sätze der Integralrechnung für die untersuchten Faktoren des Bergwerks Westfalen.	144
Tabelle 41:	Verhältnis zwischen der Deckgebirgsmächtigkeit (Summe aus Em-scher-Formation und Schichten des Turoniums und Cenomaniums) und der Gesamtteufe des Untertagebergwerks.	150
Tabelle 42:	Abschätzung des Durchbauungsgrades.	151
Tabelle 43:	Verhältnis zwischen der vertikalen Zuflussrate (Infiltrationsrate) aus dem Hangenden und der horizontalen Zuflussrate von Tiefenwasser.	152
Tabelle 44:	Normierte Wirkstärken.	155
Tabelle 45:	Klassifizierung der Prioritäten anhand der normierten Wirkstärken.	155

Anhangsverzeichnis

- Anhang 1: Geohydraulische Kenndaten für die Gesteine der Rheinisch-Westfälischen Steinkohlenlagerstätte.
- Anhang 2: Berechtsame und Umhüllende der Abbaubereiche.
- Anhang 3: Auswertung der Schachtprofile hinsichtlich der Mächtigkeit der Schichten des Turoniums und Cenomaniums.
- Anhang 4: Teufenspezifische Resthohlraumvolumina.
- Anhang 5: Teufenspezifische Durchlässigkeitskoeffizienten (nach JÄGER et al. 1990 und BALTES et al. 1998).
- Anhang 6: Statistische Auswertung der geförderten Grubenwassermengen (1970–1979) und der Abflussraten des Dickenberger Stollens (1983–2014) des Bergwerks Ibbenbüren (Abbaubereich „Westfeld“).
- Anhang 7: Wertespannbreiten der Infiltrationsspenden, die den Bergwerken Westfalen und Königsborn über den Schichten des Turoniums und Cenomaniums zufließen.
- Anhang 8: Orientierende Ermittlung der Reichweiten der hydraulisch wirksamen Einflussbereiche mittels des iterativen Verfahrens nach KERKIS (1955).
- Anhang 9: Eingangsdaten des analytischen Modells.
- Anhang 10: Statistischer (vollfaktorieller) Versuchsplan für die Ermittlung der Modellsensitivität.
- Anhang 11: Absolute und relative Abweichungen zwischen den Zeitreihen der berechneten und gemessenen Daten.
- Anhang 12: Koeffizienten (Wirkstärken) der linearen, quadratischen und wechselwirkenden Termen der Beschreibungsmodelle für die Abweichung der berechneten und gemessenen Grubenwasser(druck)fläche.
- Anhang 13: Lösungsweg für den Mittelwertsatz der Integralrechnung.
- Anhang 14: Modellergebnisse der Grubenwasser(druck)flächen.

Abkürzungen

Abkürzung	Begriff
akt	aktuell
BV	Basisvariante
C	Cenomanium
COST	change one setting at a time
DB	Durchbauungsgrad
DG	Deckgebirge
dW	dokumentierter Wert
EM	Emscher-Formation
GB	Gebirge
Gbw	Grubenwasser
GG	Grubengebäude
Gw	Grundwasser
Inf	Infiltration
K	(Ober-)Karbon
LS	Leckageschicht
max.	Maximum, maximal
min.	Minimum, minimal
OFAT	one factor at a time
oW	modellgestützt ermittelter optimaler Wert
Q^2	Vorhersagemaß
p -Wert	Überschreitungswahrscheinlichkeit, Signifikanzwert
R^2	Bestimmtheitsmaß
RF	Rohförderung
RFV	Rohfördervolumen
RHV	Resthohlraumvolumen

Abkürzungen

Abkürzung	Begriff
S	Stufe
Sch	Schicht
T	Turonium
Umf	Umfeld, benachbartes Untertagebergwerk
V	Variante
Verh.	Verhältnis
+	obere Stufe eines Faktors
–	untere Stufe eines Faktors
o	(modellgestützt ermittelter) optimaler Wert

Formelzeichen und Einheiten

Tabelle 1: Erläuterung der Formelzeichen.

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
A	durchflossene Querschnittsfläche	m^2
A_{Abbau}	Abbaufäche	m^2
$A_{\text{Absenkung}}$	Fläche des Absenkungstrichters	m^2
A_B	Fläche der Berechtsame	m^2, km^2
A_E	Fläche des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs	m^2
A_{Flutung}	Fläche des gefluteten Bereichs	m^2
A_{RHV}	mittleres (bergmännisch geschaffenes) Resthohlraumvolumen je m	m^3/m
$A_{\text{RHV},j}$	mittleres (bergmännisch geschaffenes) Resthohlraumvolumen je m, das im Zeitintervall Δt_j eingestaut wird	m^3/m
A_{Strecke}	Streckenquerschnitt	m^2
A_{T+C}	durchströmte Querschnittsfläche der Schichten des Turoniums und Cenomaniums	m^2
$A_{U,\text{Abbau}}$	Fläche der umhüllenden Abbaufäche	m^2
A_{V-BV}	(relative) Abweichung zwischen dem Wert einer Variante und der Basisvariante	
C	hydraulischer Leitwert für die Zuflussrate	m^2/d
d_{absolut}	mittlere (absolute) Abweichung der Differenz zwischen den Zeitreihen der Mess- und Modellkurve	$m, m^3/min$
d_{relativ}	mittlere (relative) Abweichung der Differenz zwischen den Zeitreihen der Mess- und Modellkurve	%
h_{Gbw}	Grubenwasser(druck)fläche	$m \text{ NHN}$
$h_{\text{Gbw},0}$	Grubenwasser(druck)fläche zu Beginn des Grubenwasseranstiegs	$m \text{ NHN}$

Formelzeichen und Einheiten

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
$h_{\text{Gbw,akt}}$	aktuelle Grubenwasser(druck)fläche	m NHN
$h_{\text{Gbw,Ende}}$	Grubenwasser(druck)fläche nach Abschluss des Grubenwasseranstiegs	m NHN
$h_{\text{Gbw},j}$	tatsächliche (gemessene) Grubenwasser(druck)fläche zum Zeitpunkt t_j	m NHN
$h_{\text{Gbw},j,\text{BV}}$	modellierte (berechnete) Grubenwasser(druck)fläche der Basisvariante zum Zeitpunkt t_j (Anm.: diese Variante weist die minimale Abweichung von der tatsächlichen [gemessenen] Grubenwasser[druck]fläche auf.)	m NHN
$h_{\text{Gbw},j+1}$	Grubenwasser(druck)fläche zum Zeitpunkt t_{j+1}	m NHN
$h_{\text{Gbw},j,\text{V}}$	modellierte (berechnete) Grubenwasser(druck)fläche einer Variante zum Zeitpunkt t_j	m NHN
$h_{\text{Gbw,KB}}$	Grubenwasser(druck)fläche im Bergwerk Königsborn	m NHN
$h_{\text{Gbw,Ost}}$	Grubenwasser(druck)fläche im Bergwerk Ost	m NHN
h_{Gw}	Grundwasser(druck)fläche (Anm.: kann in bestimmten Fällen mit der Grubenwasser[druck]fläche identisch sein)	m NHN
$h_{\text{Gw,GG}}$	Grundwasser(druck)fläche am inneren Rand zum Zeitpunkt t_j	m NHN
$h_{\text{Gw,l}}$	Grundwasser(druck)fläche am Rand des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs	m NHN
\dot{h}_{Inf}	flächenspezifische vertikale Infiltrationsspende	m/min
\check{h}_{Inf}	Abweichung des untersuchten Wertes des Faktors „Infiltrationsspende“ einer Variante zum optimalen Wert	1
$\dot{h}_{\text{Inf,EF}}$	Infiltrationsspende aus der Emscher-Formation	m/d
$\dot{h}_{\text{Inf,ges}}$	Gesamtinfiltrationsspende	m/d
$\dot{h}_{\text{Inf,T+C}}$	Infiltrationsspende aus den Schichten des Turoniums und Cenomaniums	m/d

Formelzeichen und Einheiten

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
$h_{M,DG}$	Deckgebirgsmächtigkeit	m
$h_{M,Gbw}$	Grubenwassermächtigkeit, Mächtigkeit des mit Grubenwasser erfüllten Untergrunds	m
$h_{M,GT}$	Gesamtteufe eines Untertagebergwerks (Anm.: anhand der Schachtteufe abgeleitet)	m
$h_{M,Gw}$	Grundwassermächtigkeit	m
$h_{M,Sch}$	Schichtmächtigkeit	m
$h_{M,T+C}$	Mächtigkeit der Schichten des Turoniums und Cenomaniums	m
h_s	Höhe der Absenkung	m
i	hydraulischer Gradient (mit $i = h/l$), Gefälle	1
$K_{m,n}$	Modellkonstante oder Koeffizient (Wirkstärke) eines Faktors oder Terms, der zur Anpassung des Beschreibungsmodells ermittelt werden muss	1
$K_{Zufluss}$	Modellkonstante oder Koeffizient (Wirkstärke) eines Faktors oder Terms, der zur Anpassung des Beschreibungsmodells im Hinblick auf die Abweichung zwischen berechneter und gemessener Grubenwasser(druck)fläche ermittelt werden muss	1
$K_{\Delta h}$	Modellkonstante oder Koeffizient (Wirkstärke) eines Faktors oder Terms, der zur Anpassung des Beschreibungsmodells im Hinblick auf die Abweichung zwischen berechneter und gemessener Zuflussrate ermittelt werden muss	1
$K_{\Delta h,Verh.}$	Verhältnis der Wirkstärken, normierte Wirkstärke	1
$K_{\Delta h,\check{x}_{max}}$	maximaler Koeffizient (Wirkstärke) aller Faktoren	1
$K_{\Delta h,\check{x}_n}$	Koeffizient (Wirkstärke) eines Faktors	1
k_f	Durchlässigkeitskoeffizient	m/s, m/d

Formelzeichen und Einheiten

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
\check{k}_f	Abweichung des untersuchten Wertes des Faktors „Durchlässigkeitskoeffizient“ einer Variante zum optimalen Wert	1
\bar{k}_f	harmonischer Mittelwert der Durchlässigkeitskoeffizienten	m/s, m/d
$k_{f,K}$	Durchlässigkeitskoeffizient der Schichten des Oberkarbons	m/s, m/d
$k_{f,LS}$	Durchlässigkeitskoeffizient der durchströmten, (sehr) schwach durchlässigen Leckageschicht	m/s, m/d
$\bar{k}_{f,max}$	gewichteter maximaler Mittelwert der Durchlässigkeitskoeffizienten	m/s, m/d
$k_{f,max,Sch}$	maximaler Durchlässigkeitskoeffizient einer Schicht	m/s, m/d
$\bar{k}_{f,min}$	gewichteter minimaler Mittelwert der Durchlässigkeitskoeffizienten	m/s, m/d
$k_{f,min,Sch}$	minimaler Durchlässigkeitskoeffizient einer Schicht	m/s, m/d
$k_{f,N}$	Einzelwert eines Durchlässigkeitskoeffizienten	m/s, m/d
$k_{f,T+C}$	Durchlässigkeitskoeffizient der Schichten des Turoni- und Cenomaniums	m/s, m/d
$k_{f,\Delta t}$	mittlerer Durchlässigkeitskoeffizient für das Gestein zwischen der unteren und oberen Grubenwasser(druck)fläche während des Zeitintervalls Δt_j	m/s, m/d
l	räumliche Variable der Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs mit $l_{GG} < l_E < l_{E,max}$	m
l_o	Schachtradius	m
$l_{Absenkung}$	Absenkungsreichweite	m
l_{GG}	mittlere Ausdehnung des Grubengebäudes, vom Schacht ausgehend betrachtet (innerer Rand)	m
l_E	Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs bzw. des Absenkungstrichters	m

Formelzeichen und Einheiten

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
\tilde{l}_E	Abweichung des untersuchten Wertes des Faktors „Reichweite des Einflussbereichs“ einer Variante zum optimalen Wert	1
$l_{E,erwartet}$	erwartete Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs	m
$l_{E,j}$	Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs im Zeitintervall Δt_j	m
$l_{E,max}$	maximale Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs	m
l_{GB}	Strecke des ungestörten Gebirges zwischen benachbarten Untertagebergwerken	m
$l_{U,Abbau}$	Reichweite der umhüllenden Abbaufäche	m
$l_{Zufluss}$	Länge der Zustrombreite	m
m_{RF}	Masse der Rohförderung	t
N	Anzahl	1
N_S	Anzahl der Stufen	1
N_{Sch}	Anzahl der Schichten	1
N_W	Anzahl der (Mess-)Werte	1
N_X	Anzahl der Faktoren	1
n_{DB}	Durchbauungsgrad eines Untertagebergwerks	$\frac{m^3}{m^2}$
n_P	Porenanteil	1
n_{Peff}	speichernutzbare (effektive) Porosität	1
$n_{Peff,GB}$	speichernutzbare (effektive) Porosität des Gebirges	1
$n_{P,Versatz}$	Porosität des Versatzes	1
t	Zeitdauer	s, min, d
$t_{Grubenwasseranstieg}$	Dauer des Grubenwasseranstiegs	d

Formelzeichen und Einheiten

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
t_j	Zeitpunkt j	s, min, d
t_{j+1}	Zeitpunkt $j + 1$	s, min, d
T_{Gw}	Transmissivitätskoeffizient	m^2/s
V_{Abbau}	Abbauvolumen	m^3
V_{GB}	Volumen des Gebirges innerhalb des Absenkungstrichters	m^3
V_{RFV}	Rohfördervolumen	m^3
V_{RHV}	bergmännisch geschaffenes Resthohlraumvolumen	m^3
\check{V}_{RHV}	Abweichung des untersuchten Wertes des Faktors „Resthohlraumvolumen“ einer Variante zum optimalen Wert	1
$V_{\text{RHV,Abbau}}$	Resthohlraumvolumen des Abbaus	m^3
$V_{\text{RHV,max}}$	maximales (bergmännisch geschaffenes) Resthohlraumvolumen	m^3
$V_{\text{RHV,min}}$	minimales (bergmännisch geschaffenes) Resthohlraumvolumen	m^3
V_{Senkung}	Volumen der Geländesenkung	m^3
$V_{\text{Strecke+Schächte}}$	Hohlraumvolumen der Strecken und Schächte	m^3
V_{Versatz}	Volumen des eingebrachten Versatzes	m^3
V_{Zufluss}	Zuflussvolumen	m^3
v_{Anstieg}	Anstiegsgeschwindigkeit	m/a
\dot{V}	Volumenstrom	m^3/s
\dot{V}_{DS}	Abflussrate am Dickenberger Stollen	m^3/min
$\dot{V}_{\text{Entnahme}}$	Entnahmerate	m^3/min
\dot{V}_{Inf}	Zufluss-, Infiltrationsrate	m^3/min

Formelzeichen und Einheiten

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
\dot{V}_{EM}	Zuflussrate aus den Schichten der Emscher-Formation in das Grubengebäude	m ³ /min
\dot{V}_{T+C}	Zuflussrate aus den Schichten des Turoniums und Cenomaniums in das Grubengebäude	m ³ /min
\dot{V}_{Spende}	flächenspezifische Zuflussspende	m ³ /h/km ²
\dot{V}_{Tw}	horizontale Zuflussrate von Tiefenwasser	m ³ /min
$\dot{V}_{Tw,\Delta t}$	horizontale Zuflussrate von Tiefenwasser während des Zeitintervalls Δt_j	m ³ /min
\dot{V}_{Umf}	Abflussrate aus einem Grubengebäude bzw. Zuflussrate in ein Grubengebäude	m ³ /min
$\dot{V}_{Zufluss,0}$	Zuflussrate zu Beginn eines Grubenwasseranstiegs	m ³ /min
$\dot{V}_{Zufluss,ges}$	Gesamtzuflussrate	m ³ /min
$\dot{V}_{Zufluss,j}$	tatsächliche (gemessene) Zuflussrate zum Zeitpunkt t_j	m ³ /min
$\dot{V}_{Zufluss,j,BV}$	modellierte (berechnete) Zuflussrate der Basisvariante zum Zeitpunkt t_j (Anm.: diese Variante weist die minimale Abweichung von der tatsächlichen [gemessenen] Zuflussrate auf.)	m ³ /min
$\dot{V}_{Zufluss,j,V}$	modellierte (berechnete) Zuflussrate einer Variante zum Zeitpunkt t_j	m ³ /min
$\dot{V}_{Zufluss,m}$	mittlere Zuflussrate	m ³ /min
$X_{m,n}$	unabhängiger Faktor, der die zu analysierende Ausgangsvariable beeinflusst	1
$\check{X}_{m,n}$	siehe oben. Hier: Abweichung des untersuchten Wertes einer Variante zum optimalen Wert	1
x_{oW}	modellgestützt ermittelter optimaler Wert (1 bzw. 100 %)	1; %
x_V	Wert einer Variante (in Bezug zum optimalen Wert)	1; %
y	Zielgröße, zu analysierende (abhängige) Ausgangsvariable (Effekt)	1

Formelzeichen und Einheiten

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
$y_{\Delta h}$	Abweichung zwischen den Zeitreihen der berechneten und gemessenen Grubenwasser(druck)fläche als analysierende (abhängige) Ausgangsvariable (Effekt)	1
$\bar{y}_{\Delta h, \bar{x}_n}$	Ergebnis des Mittelwertsatzes der Integralrechnung	1
$y_{\Delta Z_{\text{Zufluss}}}$	Abweichung zwischen den Zeitreihen der berechneten und gemessenen Zuflussrate als analysierende (abhängige) Ausgangsvariable (Effekt)	1
z	Teufe	m NHN
z_{Sch}	Teufenlage der Schichtgrenzen lithologischer Einheiten	m NHN
z_{Zufluss}	Teufenlage des Zuflusses von Tiefenwasser	m NHN
∂X_n	partielle Ableitung nach einem Faktor	1
α_{T+C}	Einfallwinkel der Schichten des Turoniums und Cenomaniums	° (Grad)
β	kinetischer Parameter	1/d
ε	Abweichung oder Fehler, der den Teil des zu beschreibenden Prozess darstellt, der nicht durch das gewählte Beschreibungsmodell erklärt werden kann	1
Δh	Druckhöhenunterschied (z. B. $h = h_{\text{GW}} - h_{\text{Gbw}}$)	m
$V_{\text{GBf},j}$	Hohlraumvolumen des Gebirges, welches im Zeitintervall Δt_j geflutet wird	m ³
Δh_{Gbw}	Differenz der Grubenwasser(druck)fläche am Ende und zu Beginn des Grubenwasseranstiegs (mit $h_{\text{Gbw}} = h_{\text{Gbw,Ende}} - h_{\text{Gbw,o}}$)	m
$h_{\text{Gbw},j}$	Grubenwasseranstieg innerhalb eines Zeitintervalls Δt_j	m
Δl_{LS}	Mächtigkeit der durchströmten (sehr) schwach durchlässigen Leckageschicht (m)	m
t_j	Zeitintervall	min

Formelzeichen und Einheiten

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
$V_{RHV,j}$	Resthohlraumvolumen des Grubengebäudes, welches im Zeitintervall Δt_j geflutet wird	m
$\dot{V}_{Umf,j}$	Abflussrate aus einem Grubengebäude bzw. Zuflussrate in ein Grubengebäude innerhalb eines Zeitintervalls Δt_j	m ³ /min
$V_{,j}$	Gesamtvolumen des zufließenden Wassers innerhalb eines Zeitintervalls Δt_j	m ³
$\Delta \dot{V}_{\Sigma,j}$	Wasserbilanz aus Zu- und Abflussrate innerhalb eines Grubengebäudes	m ³ /min
η	Verhältnis zwischen der vertikalen und horizontalen Zuflussrate ($\frac{\dot{V}_{Inf}}{\dot{V}_{Tw}}$)	1
ξ	Verhältnis zwischen der Deckgebirgsmächtigkeit und der Gesamtteufe eines Untertagebergwerks ($\frac{h_{M,DG}}{h_{M,GT}}$)	1
$\rho_{Gestein}$	Dichte des Gesteins	t/m ³

1 Einleitung

1.1 Einführung

Der Steinkohlenbergbau in Europa neigt sich seinem Ende zu. In den vergangenen Jahrzehnten wurde der Abbau von Steinkohle in vielen europäischen Revieren beendet (Abbildung 1; MELCHERS et al. 2019). Bergwerke können dabei aus unterschiedlichsten Gründen stillgelegt werden. Einerseits können wirtschaftliche Ursachen dazu führen, dass Bergwerke geschlossen werden, da z. B. der Rohstoffabbau in immer größere Teufen voranschreitet und dadurch die Wirtschaftlichkeit des Abbaus abnimmt. Ein Abbau kann technisch limitiert sein, wenn der Rohstoff mittels den zu dem jeweiligen Zeitpunkt zur Verfügung stehenden technischen Voraussetzungen nicht abgebaut werden kann. Da das Rohstoffvorkommen räumlich begrenzt und somit endlich ist, kann eine Lagerstätte auch vollständig ausgebeutet sein.

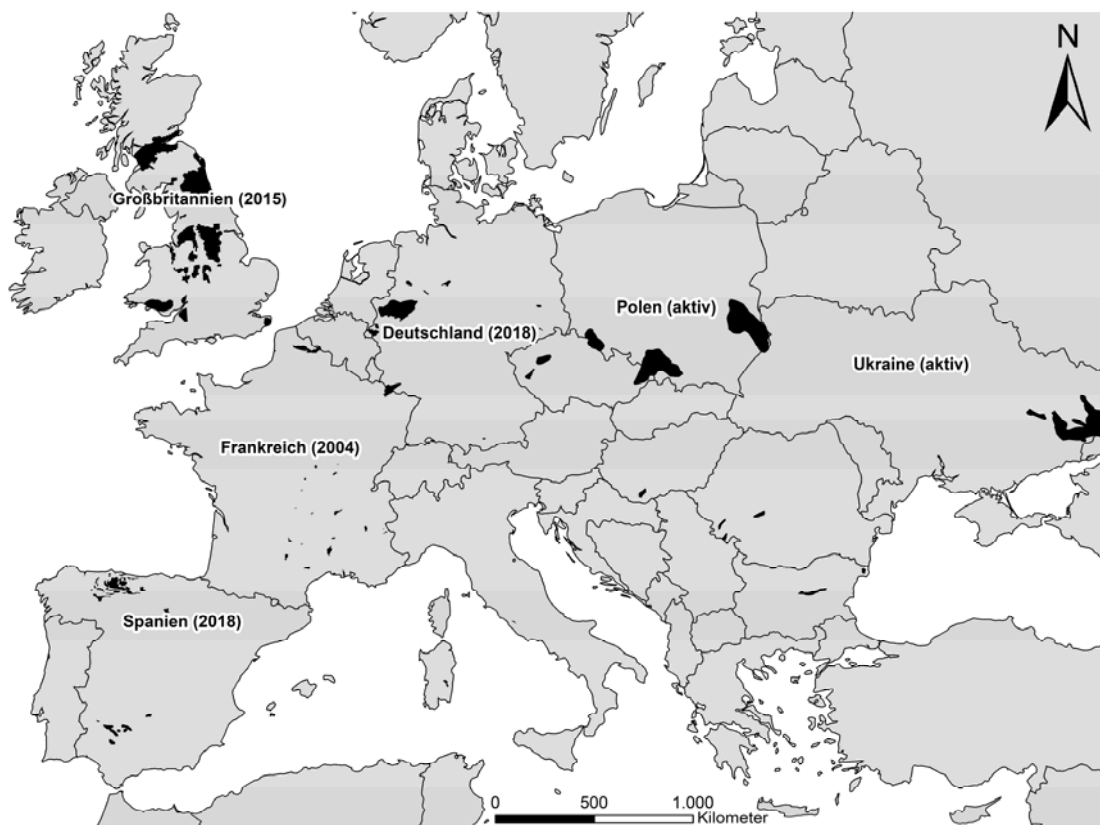


Abbildung 1: Steinkohlenvorkommen in Europa (in Klammern: Jahr der endgültigen Stilllegung; verändert nach WESTERMANN et al. 2018).

Im globalen Wettbewerb ist der wirtschaftliche Betrieb von Steinkohlenbergwerken in Europa nicht mehr realisierbar (GVSt 2019). Der Ausstieg aus dem subventionierten Steinkohlenbergbau in Deutschland wurde mit dem „Steinkohlefinanzierungsgesetz“ vom

20. Dezember 2007 (BGBl. I S. 3086) beschlossen und resultiert daher auf einer politischen Entscheidung. Ende des Jahres 2018 sind die letzten beiden Steinkohlenbergwerke Prosper Haniel in Bottrop und in Ibbenbüren stillgelegt worden. Eine Wiederaufnahme des (subventionierten) Abbaus von Steinkohle – zumindest in der Bundesrepublik Deutschland – ist in Anbetracht der politisch gewollten Energiewende nicht zu erwarten, gleichwohl noch ausreichende Reserven in den Steinkohlenlagerstätten in Nordrhein-Westfalen und im Saarland vorhanden sind.

Während der aktiven Gewinnungsphase von Rohstoffen ist es erforderlich, das Grubenwasser aus dem Grubengebäude zu pumpen, um einen sicheren Rohstoffabbau zu ermöglichen. Dies erfolgt durch die Regulierung der Zuflüsse von Grund- und Grubenwässern ins Grubengebäude. Mit der Stilllegung und Schließung eines Untertagebergwerks gibt es keine betriebliche Notwendigkeit, die Wasserhaltung in dem Umfang, wie es während der aktiven Gewinnungsphase erforderlich war, zu betreiben. In den meisten Fällen wird dann die Wasserhaltung im Grubengebäude außer Betrieb genommen oder zumindest reduziert. Die Folge ist der Anstieg des Grubenwassers im Grubengebäude. Die Messung und Dokumentation des Grubenwasseranstiegs sind Auflagen von Abschlussbetriebsplänen. In der Vergangenheit lief der Grubenwasseranstieg aber gelegentlich auch unkontrolliert ab oder wurde messtechnisch nicht dokumentiert (MELCHERS et al. 2019; WESTERMANN et al. 2019).

Neben ökonomischen Aspekten, indem z. B. Kosten für den Betrieb der Pumpen gespart werden, wirkt sich ein Grubenwasseranstieg auch positiv auf die Ökologie aus (WOLKERSDORFER 2008). So nehmen einerseits die Einleitemengen des (oftmals) höher mineralisierten Grubenwassers mit ansteigender Grubenwasser(druck)fläche ab (quantitative Verbesserung; BANKS 2001). Andererseits verbessert sich die hydrochemische Beschaffenheit des Grubenwassers, indem chemische Prozesse in wassergesättigten Bereichen verlangsamt oder gar unterbunden werden, die ansonsten beispielsweise Metalle und Sulfate freisetzen (qualitative Verbesserung; YOUNGER 1997; YOUNGER 2000; YOUNGER & ADAMS 1999). Die Auffüllung des untertägigen Grubengebäudes mit Wasser erhöht ebenso dessen Stabilität, wodurch z. B. das Risiko von Tagesbrüchen reduziert werden kann. Neben den kontrollierten und mit einem bestimmten Ziel verbundenen Grubenwasseranstiegen können auch unvorhergesehene Ereignisse (z. B. Wassereinbrüche aus benachbarten Grubenfeldern, kriegerrische Einwirkung, Naturkatastrophen) dazu führen, dass das Grubenwasser unkontrolliert ansteigt (JOB 1987a; JOB 1987b; VUTUKURI & SINGH 1995; WOLKERSDORFER 2008).

Die natürlichen (vor allem geologischen und hydrogeologischen) sowie anthropogenen (vor allem bergbaulich induzierten) Gebirgseigenschaften im Umfeld von Untertageberg-

werken variieren in vielen Lagerstätten auf engstem Raum. Die Komplexität der Bergwerksgeometrie und die standortspezifischen hydrogeologischen Gebirgseigenschaften bewirken, dass die Grubenwasseranstiegsverläufe sich je nach Standort unterscheiden (ROSNER 2011; MELCHERS et al. 2019; Abbildung 2). Diese Variabilität in der Verteilung der natürlichen und anthropogenen Gebirgseigenschaften erschweren die Prognose eines Grubenwasseranstiegs hinsichtlich der hydraulischen und hydrochemischen Auswirkungen auf die Natur.

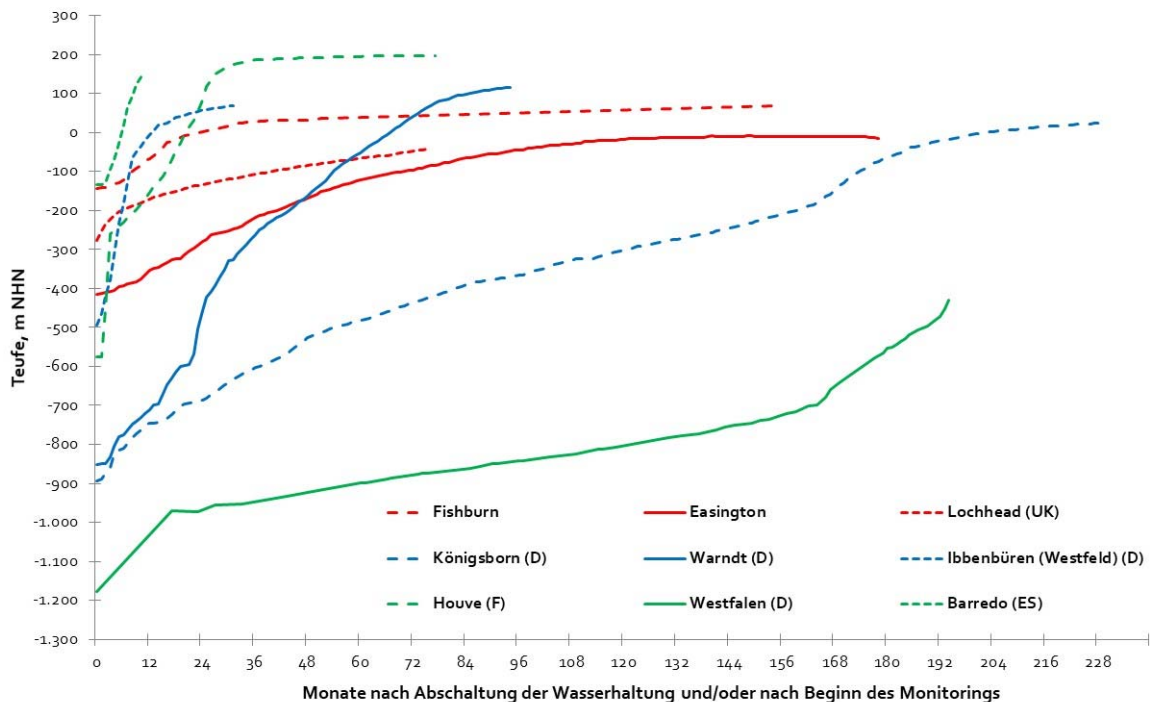


Abbildung 2: Grubenwasseranstiege in ehemaligen europäischen Steinkohlenrevieren (MELCHERS et al. 2019).

Je nach Zielsetzung und Größe des Untersuchungsgebiets können unterschiedliche Modellansätze für die Berechnung der Grund- und Grubenwasserströmung angewendet werden (YOUNGER & ADAMS 1999). Modelle stellen dabei den Ablauf solcher komplexen Prozesse dar, indem die Natur in einer simplifizierten Art nachgebildet wird. Relevante Eigenschaften werden im Modell realitätsnah dargestellt, während andere eher unwichtigere Aspekte hingegen vereinfacht oder gar außer Acht gelassen werden. Modellergebnisse zu vergangenen Grubenwasseranstiegen belegen allerdings, dass die prognostizierten Zeiträume vielfach zu kurz waren und die tatsächlichen Grubenwasseranstiege länger andauerten (z. B. GOERKE-MALLET 2000; RÜTERKAMP et al. 2000). Diese Abweichung beruht oftmals auf unzureichende Informationen über die erforderlichen Modelleingangsdaten (MELCHERS et al. 2019).

1.2 Problembeschreibung und Ziele der Arbeit

Um die Auswirkungen eines Grubenwasseranstiegs auf die Natur und Infrastruktur beherrschen zu können, ist eine zuverlässige Prognose über den räumlich-zeitlichen Grubenwasseranstiegsverlauf erforderlich. Dies ist jedoch nur möglich, wenn die hydraulischen und geochemischen Vorgänge im Grubengebäude verstanden sind. Die Modellierung dieser Vorgänge kann ein Hilfsmittel sein, ein System- und Prozessverständnis zu entwickeln. Alle Modelle haben gemein, dass diese auf vertrauenswürdigen und möglichst realitätsnahen Modelleingangsdaten beruhen.

Das Grubengebäude eines Untertagebergwerks erstreckt sich oftmals über eine große Fläche und Teufe. Folglich wirken die Eigenschaften eines ausgedehnten Gebirgsvolumens auf das ansteigende Grubenwasser. Um belastbare Modellergebnisse zu erhalten, ist eine möglichst detaillierte Kenntnis über die räumliche Verteilung der natürlichen und anthropogenen Faktoren erforderlich. Allerdings liegen diese Daten oftmals nicht in dem erforderlichen Umfang sowie in der notwendigen Qualität vor. Eine exakte Erhebung dieser Daten ist in vielen Fällen aufwändig und erfolgt daher oftmals nur annäherungsweise. Die Bestimmung wird erschwert, wenn diese erst nach Beendigung der aktiven Gewinnungsphase, also in der Nachbergbauphase, geschieht. Komplexer aufgebaute (numerische) Modelle verlieren unter diesen Umständen gegebenenfalls ihre Vorteile im Vergleich zu einfacher aufgebauten (analytischen) Modellen, deren Berechnung auf den mathematischen und hydrogeologischen Grundgleichungen und -annahmen basieren (WESTERMANN et al. 2019).

Zielsetzung dieser Dissertation ist es, zunächst die natürlichen und anthropogenen Gebirgseigenschaften einer Steinkohlenlagerstätte zu identifizieren, die den räumlich-zeitlichen Grubenwasseranstiegsverlauf beeinflussen. Es werden charakteristische Wertespannbreiten benannt. Für standortspezifische Gebirgseigenschaften, für die keine Literaturwerte existieren, werden rechnerische Ansätze auf Basis der Grundgleichungen der Grundwasserdynamik angewendet.

Ein wichtiger Aspekt des Prozess- und Systemverständnisses ist die Kenntnis über die Wirkung dieser Faktoren auf den Prozess. Für die Evaluierung dieser faktorspezifischen Einflussnahme auf den Grubenwasseranstiegsverlauf dient ein eigens dafür entwickeltes analytisches Modell. Diese Arbeit beschreibt den Aufbau und die Verwendung dieses analytischen Modells, mit dem auch Grubenwasseranstiege modelliert werden können, wenn die Datengrundlage gering ist.

Mit der statistischen Versuchsplanung (Design of Experiments) wird ein mathematisches Verfahren angewendet, welches sich zwar bereits in vielen Bereichen der Forschung, Entwicklung und Industrie etabliert hat, jedoch im Bereich der speziellen Hydrogeologie im (Nach-)Bergbau noch überwiegend unbekannt ist (Abschnitt 1.3.3). Anhand der Ergebnisse können wichtige, d. h. systembestimmende, von unwichtigeren Faktoren unterschieden werden. Mit diesem Wissen kann der Fokus von Monitoringmaßnahmen zukünftiger Grubenwasseranstiege zielgerichtet auf jene systembestimmenden Faktoren gelegt werden.

1.3 Kenntnisstand

1.3.1 Grubenwasseranstiegsprozess in Untertagebergwerken

Wenn ein Untertagebergwerk planmäßig stillgelegt wird, kann die Wasserhaltung außer Betrieb genommen oder reduziert werden. Der Grubenwasseranstieg läuft dann in vielen Fällen kontrolliert ab (Abschnitt 1.4.2; BURGHARDT et al. 2017). Aber auch andere, unplanmäßige Ereignisse verursachen einen Grubenwasseranstieg. Dazu zählen u. a. Wassereinträge aus benachbarten Grubenbereichen (JOB 1987a; JOB 1987b; VUTUKURI & SINGH 1995), Infiltration von Oberflächenwasser aus Vorflutern infolge tagesnahe Abbau (ORDÓÑEZ et al. 2012) oder auch der Ausfall der Wasserhaltung durch höhere Gewalt (WOLKERSDORFER 2008). Diese Ursachen können dazu führen, dass der Grubenwasseranstieg unkontrolliert abläuft (Abschnitt 1.4.2; BURGHARDT et al. 2017).

Sowohl in der nationalen als auch internationalen Fachwelt haben sich Wissenschaftler und Ingenieurbüros mit dem Prozess des Grubenwasseranstiegs und dessen Folgen auf die Umwelt und Infrastruktur befasst (Tabelle 2). Eine Vielzahl an Veröffentlichungen beschreibt Konzepte und den Ablauf abgeschlossener Grubenwasseranstiege. Andere Autoren wiederum befassen sich mit deren Modellierung und Prognose zukünftiger Grubenwasseranstiege (Abschnitt 1.3.2). Eine Zitierung aller Untersuchungen ist nicht möglich. Daher werden im Folgenden nur ausgewählte Arbeiten genannt. Eine Zusammenfassung aktueller Erkenntnisse, die im Zusammenhang mit der Evaluierung von Grubenwasseranstiegen in ehemaligen europäischen Steinkohlenrevieren gewonnen wurden, geben MELCHERS et al. (2019).

Die ersten Untersuchungen zu einem kontrolliert ablaufenden Grubenwasseranstieg in einem Untertagebergwerk erfolgten im Kalisalzbergwerk Hope bei Hannover in den 1980er Jahren. Dieser wurde durch ein geohydrochemisches, geomechanisches und geophysikalisches Monitoring umfangreich begleitet (HERBERT & SANDER 1987). Die Wismut GmbH er-

arbeitete Anfang der 1990er-Jahren Konzepte für die Verwahrung der Hinterlassenschaften des Uranbergbaus in den Bundesländern Thüringen und Sachsen (USAKO 1991; USAKO 1993). Diese beinhalteten vor allem Maßnahmen für den kontrollierten Grubenwasseranstieg. In diesem Zusammenhang wurden die ersten modelltechnischen Bewertungsansätze erarbeitet.

Eine Vielzahl an Grubenwasseranstiegen in ehemaligen deutschen Steinkohlenrevieren, die in den vergangenen rd. 25 Jahren abliefen, wurde ebenfalls von wissenschaftlicher Seite betrachtet. Viele dieser früheren Grubenwasseranstiege sind oftmals unbemerkt abgelaufen (z. B. Barsinghausen, südbayerische Pechkohle; MELCHERS et al. 2019). Neben ganzheitlichen Betrachtungen der Auswirkungen eines Grubenwasseranstiegs wurde oftmals der Fokus der Betrachtung auf einem ausgewählten Prozess gelegt (Tabelle 2). Eine Bewertung der auf den Grubenwasseranstiegsprozess einflussnehmenden Faktoren ist dem Verfasser nicht bekannt.

Tabelle 2: Ausgewählte, frei zugängliche Literatur zu Grubenwasseranstiegen in ehemaligen deutschen Steinkohlenrevieren.

Steinkohlenrevier	Autoren (Beispiele)	Fokus
Ruhrgebiet	HEITFELD et al. (2014); ROSNER et al. (2014); HEITFELD & ROSNER (2015)	Bodenbewegungen
Saarland	SCHÄFER (2016a); SCHÄFER (2016b)	Ganzheitliche Betrachtung, Bodenbewegungen
Ibbenbüren	DOMALSKI (1987), GOERKE-MALLET (2000)	Ganzheitliche Betrachtung
Aachen	HEITFELD et al. (2005); ROSNER (2011)	Ganzheitliche Betrachtung (mit Grubenwasseranstieg in Südlimburg)
Erkelenz	BAGLIKOW (2010)	Bodenbewegungen
Gittersee	TUNGER (2008); MANN & WEDEKIND (2010)	Bodenbewegungen, ganzheitliche Betrachtung

Auch internationale Autoren haben sich mit dem Grubenwasseranstiegsprozess fachlich auseinandergesetzt. Eine Übersicht über die Grubenwasseranstiege in den ehemaligen britischen Steinkohlenrevieren geben beispielsweise YOUNGER & ADAMS (1999), WHITWORTH (2002), YOUNGER et al. (2002) und BURKE & BARBER (2004). ORDÓÑEZ et al. (2012)

werten den Grubenwasseranstieg im asturischen Steinkohlenrevier hinsichtlich der Zusammensetzung und Entwicklung der Zuflussraten aus. Eine Analyse eines Landesgrenzen überschreitenden Grubenwasseranstiegs führen beispielsweise ECKART et al. (2006) und CORBEL et al. (2017) für das geologisch und bergbaulich zusammenhängende (ehemalige) saarländische und lothringische Steinkohlenrevier durch.

1.3.2 Modellierung eines Grubenwasseranstiegs

Nach DUDEN (o. J.) ist ein Modell in wissenschaftlicher Sicht eine „vereinfachte Darstellung der Funktion eines Gegenstands oder des Ablaufs eines Sachverhalts, die eine Untersuchung oder Erforschung erleichtert oder erst möglich macht“. Modelle können nie die Natur im Ganzen abdecken und stellen daher nur eine Abstraktion dessen dar. Modelle sind mit Randbedingungen simplifiziert, ermöglichen aber die Betrachtung eines bestimmten Prozesses oder einer Interaktion.

Modelle werden vielfach genutzt, um einen bestimmten Prozess genauer zu untersuchen bzw. eine Vorhersage (Prognose) zu treffen. Die Anwendung von Modellen zum Zwecke einer Prognose wird immer bedeutsamer. Dafür können unterschiedliche Arten an Modellen verwendet werden. Es wird unterschieden in (HÖLTING & COLDEWEY 2013):

- Physikalische Modelle, wie beispielsweise Sand-, Spalt-, Analogiemodelle.
- Mathematische Methoden und Modelle, wie beispielsweise analytische Methoden, numerische Modelle (u. a. Finite Differenzen-Methode [FDM], Finite-Elemente-Methode [FEM]).

Grundlegend wird zwischen einem fluiddynamischen und einem geochemischen Modell unterschieden. Die Art und Kopplung unterschiedlicher Modelle hängt von dem Prozess ab, der mit dem Modell bewertet werden soll. Ein Modell kann dabei rein konzeptionell sein oder eine Visualisierung in einer (1D), zwei (2D) oder drei Dimensionen (3D) beinhalten. Ebenso wird die Entwicklung eines Faktors gegen die „Zeit“ als weitere Dimension (4D) berücksichtigt.

Für den Bereich des Grubenwassermanagements werden seit über zwei Jahrzehnten vor allem numerische Modelle (z. B. Grund- und Grubenwasserströmungsmodelle) verwendet (PAUL et al. 1998). Der Aufbau numerischer Modelle setzt die detaillierte Kenntnis über die räumliche Verteilung natürlicher und anthropogener Eigenschaften der Lagerstätte voraus. Aufgrund der oftmals großen räumlichen Ausdehnung von Lagerstätten werden diese numerischen Modelle bei vielen Softwareansätzen in vergleichsweise große Bilanzzellen eingeteilt. Diese unterscheiden sich hinsichtlich der Parameterverteilung voneinander (ECKART et al. 2006). Numerische Modelle werden durch definierte Randbedingungen (NEUMANN-, CAUCHY-, DIRICHLET-Randbedingung; HÖLTING & COLDEWEY 2013) begrenzt, an

denen sich die Grundwasserverhältnisse durch die zu untersuchenden Maßnahmen (z. B. Wasserhaltung) nicht verändern. Die Bergwerksgeometrie kann in einigen Modellen implementiert werden.

Einige der als Modelleingangsdaten bedeutsamen Faktoren sind nur mit großem Aufwand zu erheben oder bleiben infolge der fehlenden/erschweren Zugänglichkeit bzw. Verfügbarkeit oftmals unbekannt. Auch die oftmals große Flächenausdehnung des Untersuchungsgebiets (bis zu $> 100 \text{ km}^2$; BANKS et al. 1997; YOUNGER & SHERWOOD 1993; ECKART et al. 2018) erschwert eine detaillierte Beschreibung der hydrogeologischen und bergbaulichen Kenndaten in dem Umfang, der für die numerische Modellierung erforderlich ist. Eine Vereinfachung der Gegebenheiten ist daher unumgänglich. Ein Grundsatz der Modellierung lautet, dass das Modellergebnis immer nur so gut ist wie die verwendeten Modelleingangsdaten.

Die ersten Modelle zur Modellierung von Grubenwasseranstiegen wurden bereits Anfang der 1990er-Jahre entwickelt. Hierzu zählen beispielsweise (WESTERMANN et al. 2019):

- Monte-Carlo-Methode (z. B. AURADA 1970),
- Box-Modell (z. B. LUCKNER 1985; ECKART 1993),
- SPRING (DELTA H 2013),
- MODFLOW (z. B. HAMER et al. 1995),
- GRAM (Groundwater Rebound in Abandoned Mineworkings; z. B. SHERWOOD & YOUNGER 1994, SHERWOOD 1997; SHERWOOD & YOUNGER 1997),
- FEFLOW (z. B. VOIGT & DIERSCH 1999),
- VSS-NET (EWEN et al. 2000),
- LIKOP (ROGOZ & POSY EK 2000),
- MIFIM (Mine Water Filling Model, z. B. BANKS 2001),
- GoldSim (z. B. JAKUBICK et al. 2002).

Programme zur geochemischen Modellierung sind in der oberen Auflistung nicht berücksichtigt.

1.3.3 Statistische Versuchsplanung (Design of Experiments)

Nach DUDEN (o. J.) werden durch einen „Versuch“ (oder auch Experiment, Test) Bedingungen geschaffen, unter denen sich bestimmte Vorgänge, die Gegenstand des wissenschaftlichen Interesses sind, beobachten und untersuchen lassen.

Ein Versuch kann auf verschiedene Weisen durchgeführt werden:

- **Versuch und Irrtum** (Trial and Error): Zufällige Veränderung der Faktoren, bis die gewünschte Lösung gefunden ist („Ausprobieren“).
- **Ein Faktor nach dem Anderen** (OFAT-Methode [One Factor At a Time]; COST-Methode [Change One Setting at a Time]): Veränderung von einem Faktor, bis sich das Ergebnis der gewünschten Lösung nähert, während die anderen Faktoren unverändert bleiben. Der zuvor variierte Faktor bleibt im nächsten Schritt unverändert und ein anderer Faktor wird bis zur zufriedenstellenden Annäherung an die gewünschte Lösung verändert, während die anderen Faktoren unverändert bleiben. Dieser Versuchsansatz berücksichtigt keine Wechselwirkungen zwischen den Faktoren (ERIKSON et al. 2008).

Diese beiden intuitiven Vorgehensweisen führen nur durch Zufall und oftmals bei höherem Aufwand zu den gewünschten Lösungen. Die Identifikation der optimalen Faktorkombination ist nicht gesichert. Einzel- und Wechselwirkungen von Faktoren können nur bedingt abgeleitet werden.

Eine Methodik zur systematischen Planung und statistischen Auswertung von Versuchsreihen ist die statistische Versuchsplanung (engl. Design of Experiments [DoE]), die erstmalig von Sir Ronald Aylmer Fisher im Jahr 1935 eingeführt wurde (FISHER 1935). Diese Methodik zeichnet sich dadurch aus, dass die Wirkung vieler Faktoren auf ein System mit einer vergleichsweise geringen Anzahl an Versuchen untersucht werden kann (BANDEMÉR & BELLMANN 1994; KROTTMAIER 1994; SCHEFFLER 1997; CZITROM 1999; KLEPPMANN 2008; GOH 2013). Die zu untersuchenden Systeme können vielfältig sein: Prozesse, Organisationen oder auch technische Produkte. Im Gegensatz zur OFAT- oder COST-Methode werden alle Faktoren gleichzeitig variiert und in Bezug zu der Zielgröße (Effekt) gesetzt, wodurch Wechselwirkungen zwischen mehreren Faktoren aufgezeigt werden können (SIEBERTZ et al. 2017). Die Anwendung der statistischen Versuchsplanung verschafft somit ein vertieftes Verständnis über die Einflussnahme einzelner oder einer Kombination mehrerer Faktoren (unabhängige Variable) auf den beobachteten Effekt (Mess- oder Zielgrößen; abhängige Ausgangsvariable; Abbildung 3). Ein Ziel der statistischen Versuchsplanung ist die Bestimmung der Signifikanz, d. h. die Höhe der Einflussnahme eines Faktors oder auch die Kombinationen der Faktoren, auf einen Prozess.

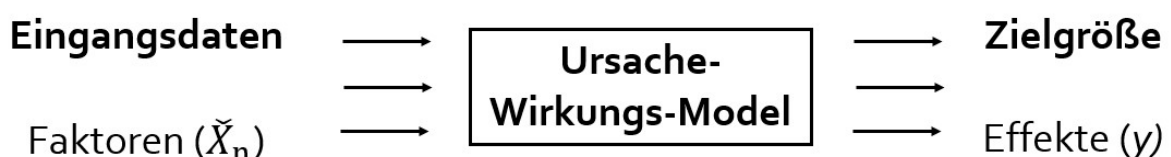


Abbildung 3: Prinzip der statistischen Versuchsplanung.

Abschnitt 1.3 – Kenntnisstand

Die statistische Versuchsplanung findet seit den 1980er Jahren vielfach Anwendung in der Forschung, Entwicklung und Industrie (CAPACI et al. 2017; SIEBERTZ et al. 2017). Dazu zählen beispielsweise:

- Chemische Industrie (u. a. RADHAKRISHNAN et al. 2012; RENZI et al. 2014; ARENAS et al. 2017),
- Lebensmittelindustrie (u. a. BOTH et al. 2013; MACCALMAN et al. 2016),
- Biotechnologie (u. a. ANSELMANT et al. 2012; KUMAR et al. 2013; SOUARD et al. 2015; VON STOSCH & WILLIS 2017; LANARI et al. 2018),
- Medizin (u. a. MURPHY et al. 2017),
- Physiologie (u. a. BALFAGÒN et al. 2010),
- Elektrophysik (u. a. NAISHADHAM 2010; TSIKONIS et al. 2011; MEI et al. 2015).

Aber auch in anderen Bereichen wie z. B. im Fahrzeugbau oder im Marketing wird die statistische Versuchsplanung angewendet (ERIKSSON et al. 2008).

Typische Anwendungsfelder in den o.g. Themenbereichen sind (ERIKSSON et al. 2008):

- Entwicklung neuer Produkte und Prozesse,
- Verbesserung bestehender Produkte und Prozesse,
- Optimierung der Qualität und Leistungsfähigkeit von Produkten,
- Identifikation systembestimmender Faktoren,
- Reduzierung der Produktionskosten,
- Prüfung der Robustheit eines Produkts oder Prozesses.

Die statistische Versuchsplanung wird mit dieser Arbeit erstmalig und erfolgreich im Bereich der speziellen Hydrogeologie im (Nach-)Bergbau angewendet, um ein vertieftes Verständnis über den komplexen Vorgang eines Grubenwasseranstiegs in einem Untertagebergwerk zu erlangen.

Die Anwendung und Auswertung der statistischen Versuchsplanung lassen sich durch den Einsatz spezieller Statistiksoftware vereinfachen. Diese erlauben neben den automatischen Berechnungen (Abschnitt 3.3.3) auch die aussagekräftige grafische Darstellung der Ergebnisse (Abschnitt 3.3.1 und Abschnitt 3.3.2). Neben umfassenden Statistikprogrammen (z. B. Statistica Desktop [StatSoft]; Statgraphics Centurion 18 [Statgraphics Technologies]) stehen auch spezielle Software für die statistische Versuchsplanung zur Verfügung (z. B. Design Expert [STATCON GmbH]; Stavex [AICOS Technologies AG]). Im Rahmen dieser Arbeit wird die Software MODDE Pro (Version 12.1) der Fa. Sartorius Stedim Data Analytics AB (Malmö, Schweden) genutzt, die zu der speziellen Versuchsplanungssoftware gehört (ERIKSSON et al. 2008). Diese Software ist für die Planung und Auswertung von Versuchen optimiert. Der Aufbau und die Funktionsweise dieser Statistiksoftware wird im Abschnitt 3 ausführlich beschrieben.

1.4 Begriffsbestimmungen

1.4.1 Wassertypen

In der vorliegenden Arbeit – wie auch in der nationalen und internationalen wissenschaftlichen Fachliteratur sowie in der aktuellen öffentlichen Diskussion – wird der Begriff „Grubenwasser“ bzw. „(acid) mine drainage“ (AMD) verwendet. Allerdings existiert (bislang) für den Begriff „Grubenwasser“ keine allgemein verbindliche oder rechtliche Legaldefinition. Fehlende Definitionen führen in vielen Fällen dazu, dass der gleiche Begriff für verschiedene Sachverhalte, aber auch unterschiedliche Worte für den gleichen Sachverhalt verwendet werden. So ist es – selbst in wissenschaftlicher Fachliteratur nicht ausgeschlossen – zu beobachten, dass der Begriff „Grubenwasser“ mit „Grundwasser“ oder sogar mit „Abwasser“ verwechselt wird. Im Folgenden sollen die grundlegenden Unterschiede zwischen diesen Begriffen daher erläutert werden:

Grundwasser

In Abhängigkeit von den Bildungsbedingungen, ihren Vorkommen und ihren Migrationswegen werden verschiedene Wassertypen in der Erdkruste unterschieden. Der Begriff „Grundwasser“ wird gemäß der DIN 4049-3 (1994) als „unterirdisches Wasser, das Hohlräume der Lithosphäre zusammenhängend ausfüllt und dessen Bewegungsmöglichkeit ausschließlich durch die Schwerkraft bestimmt wird“, definiert. Die Erläuterung lehnt sich an den § 1 (Artikel 1, Absatz 2) des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) an, der „Grundwasser“ als „alles unterirdische Wasser in der Sättigungszone beschreibt, das in unmittelbarer Berührung mit dem Boden oder dem Untergrund steht“.

In Anlehnung an die DIN 4049-3 (1994) wird Grundwasser weiter unterteilt (siehe auch BURGHARDT et al. 2017). In Abhängigkeit von den hydrostatischen Druckverhältnissen ist Grundwasser frei bzw. ungespannt (Grundwasseroberfläche = Grundwasserdruckfläche), gespannt (Grundwasseroberfläche < Grundwasserdruckfläche) oder auch artesisch gespannt (Grundwasserdruckfläche > Erdoberfläche).

In Abhängigkeit von der Art des Hohlraums, in dem Grundwasser strömt, wird in Porengrundwasserleiter (durchflusswirksamer Hohlraumanteil sind Poren im Locker- oder Festgestein), Kluftgrundwasserleiter (durchflusswirksamer Hohlraumanteil sind Trennflächen [Störungen, Klüfte, Schichtfugen, Schieferungsflächen] im Festgestein) oder Karstgrundwasserleiter (durchflusswirksamer Hohlraumanteil sind Trennflächen, die durch Lösungsvorgänge entstanden sind) unterschieden (PRINZ & STRAUß 2018).

Grundwasser wird in Abhängigkeit von dessen Beteiligung am hydrologischen Zyklus wie folgt unterteilt:

- meteorisches (oder auch atmosphärisches) Wasser, welches in der Atmosphäre gespeichert ist und in Abhängigkeit von der Wassersättigung der Atmosphäre in Niederschlag in Form von Regen, Schnee, Tau oder Hagel übergeht und somit direkt an den hydrologischen Zyklus teilnimmt (ADAM et al. 2000),
- tiefes Grundwasser, das in tiefer gelegenen Grundwasserleitern zirkuliert und infolge einer langen Aufenthaltszeit meist durch eine hohe Mineralisation und reduzierende Eigenschaften gekennzeichnet ist und nur in geringerem Maße am hydrologischen Zyklus teilnimmt (DIN 4049-3 1994),
- Formationswasser (oder auch konnates, formationelles, fossiles Wasser), das syngedimentär gebildet wurde und in den Gesteinsporen eingeschlossen wurde und nur in geringem Maße am hydrologischen Zyklus teilnimmt (ADAM et al. 2000),
- juveniles Wasser, welches direkt aus dem Erdinnern stammt und noch nicht am hydrologischen Zyklus, weder auf noch unter der Erdoberfläche, teilgenommen hat (ADAM et al. 2000).

Grundwasser wird ebenfalls in Abhängigkeit von der Mineralisation untergliedert (z. B. FURTAK UND LANGGUTH 1967). Darauf wird allerdings nicht weiter eingegangen.

Grubenwasser

Weder in deutschen Normen noch in wasser- oder bergrechtlichen Gesetzgebungen ist der Begriff „Grubenwasser“ einvernehmlich definiert. Der Arbeitskreis Grubenwasser in der Fachsektion Hydrogeologie e. V. in der DGGV e. V. hat im Jahre 2017 den Begriff „Grubenwasser“ wie folgt definiert (BURGHARDT et al. 2017):

„Alles Wasser, das mit Tief- und Tagebauen in Kontakt steht oder stand. Dabei handelt es sich überwiegend um natürliches Wasser in Form von Sicker- und Grundwasser. Sogenanntes Tageswasser kann z. B. durch Niederschläge und Vorfluter bei fehlendem Deckgebirge unmittelbar in die Grubenbaue eindringen. Wasser aus dem Deckgebirge kann durch Poren-, Trennfugen- und Karsthohlräume sowie durch anthropogene Auflockerungen, z. B. durch Schächte, in die Grubenbaue eindringen. Tiefes Grundwasser mit z. T. hoher Mineralisation (Sole) kann den Grubenbauen aus dem angrenzenden und liegenden Gebirgskörper zufließen. Diese Definition beinhaltet keine Aussage zur Grubenwasserbeschaffenheit. Diese ist in Abhängigkeit von der Genese des Grubenwassers stark unterschiedlich.“

1.4.2 Grubenwasseranstieg, Flutung

In der wissenschaftlichen Fachwelt werden die Begriffe „Grubenwasseranstieg“ und „Flutung“ als Synonyme verwendet. Diese beiden Begriffe werden erstmalig in BURGHARDT et al. (2017) im Hinblick auf die Semantik getrennt. Darin wird der Begriff „Grubenwasseranstieg“ als der Anstieg des Wasserspiegels im Grubengebäude definiert. Dieser kann einerseits passiv erfolgen, indem die Wasserhaltung außer Betrieb genommen oder reduziert wird. Andererseits kann Wasser aktiv von außen in das Grubengebäude zugeführt werden, wodurch der Grubenwasseranstieg beschleunigt wird.

Der Begriff „Flutung“ beschreibt hingegen allgemein den Vorgang des Grubenwasseranstiegs im Tage- und Tiefbau (BURGHARDT et al. 2017). Flutungen werden durchgeführt, um die (nahezu) ursprüngliche hydrogeologische Situation vor Beginn der Bergbautätigkeiten wiederherzustellen. Als Folge wird die geotechnische Sicherheit der Tagesoberfläche erhöht, die Oxidation von Disulfiden und Mobilisierung von Metallen minimiert sowie die Menge und Qualität des in Vorfluter eingeleiteten Grubenwassers verringert. Dadurch reduzieren sich gleichfalls der Aufwand und die Kosten für Wasserhaltungsmaßnahmen.

Die Zuführung von Wasser zur Beschleunigung des Grubenwasseranstiegs (aktive Flutung) im deutschen Steinkohlenbergbau, aber auch im internationalen Bereich, ist nicht bekannt (MELCHERS et al. 2019). Diese Methode ist eher im Braunkohletagebau (LUA 2001; SCHULTZE et al. 2018) oder im Salzbergbau üblich.

Auch in der englischen Fachsprache existieren mehrere Begriffe, die den Prozess des Grubenwasseranstiegs beschreiben. Dazu zählen z. B. flooding, mine water rebound, mine water recovery.

1.4.3 Statistische Versuchsplanung

Ein Vorteil der statistischen Versuchsplanung ist die standardisierte Vorgehensweise (SIEBERTZ et al. 2017). Dazu sind einheitliche Begriffe vorausgesetzt. In der statistischen Versuchsplanung werden folgende Begriffe verwendet (KROTTMAIER 1994; SIEBERTZ et al. 2017):

- **Beschreibungsmodell:** ein in mathematischen Formeln beschriebenes Modell, das versucht, die wesentlichen Faktoren eines Prozesses bzw. Systems zu erfassen. Das Modell kann mittels der mathematischen Formeln berechnet und wissenschaftlich geprüft werden.
- **Faktor:** Eingangsgröße, dessen Wirkung auf ein System oder einen Prozess durch Variation innerhalb einer Wertespannbreite bestimmt werden soll; entspricht der unabhängigen Variablen in einem Beschreibungsmodell.

- **Effekt:** Zielgröße, die sich aus der Variation der Faktoren ergibt; entspricht der abhängigen Ausgangsvariablen in einem Beschreibungsmodell.
- **Term:** mathematisch sinnvoller Ausdruck, der Ziffern, Variablen, Rechenzeichen und Klammern enthält.
- **Wechselwirkung, Wechselwirkungseffekt:** direkte Abhängigkeit von zwei oder mehreren Faktoren voneinander.
- **Stufen:** festgelegte Zustände für eine Faktoreneinstellung. Oftmals bilden die untere und obere Grenze einer zu untersuchenden Wertespannbreite den Wert der jeweiligen Stufe.
- **Regressionskoeffizient:** misst den Einfluss einer unabhängigen Variablen in einem Beschreibungsmodell.
- **Wirkstärke:** Synonym für Regressionskoeffizient; beschreibt quantitativ die Wirkung eines Faktors auf ein System oder einen Prozess.
- **Sensitivität:** Empfindlichkeit eines Systems oder eines Prozesses auf die Veränderung einer unabhängigen Variablen.
- **Basisvariante:** Modellvariante, die die minimale quadratische Abweichung zwischen den Zeitreihen der berechneten und gemessenen Daten (Grubenwasser[druck]fläche, Zuflussrate) aufweist. Diese repräsentiert daher die tatsächlich gemessene Kurve. Die Basisvariante dient der Bestimmung der Abweichungen der übrigen berechneten Modellkurven zu dieser Variante.

2 Methodik

2.1 Arbeitsvorbereitung

2.1.1 Auswahl der Untersuchungsgebiete

Die Untersuchung wird an den drei Steinkohlenbergwerken Ibbenbüren, Königsborn (Unna) und Westfalen (Ahlen) vorgenommen, die sich im Verantwortungsbereich der RAG AG und der RAG Anthrazit Ibbenbüren GmbH befinden (Abschnitt 5). Entscheidend für die Auswahl der berücksichtigten Untersuchungsgebiete waren die folgenden Aspekte:

- Der Grubenwasseranstieg ist abgeschlossen bzw. weit vorangeschritten und ist messtechnisch begleitet und dokumentiert worden.
- Hydrogeologische und bergbauliche Grundlageninformationen sind verfügbar und hinsichtlich ihrer Quantität und Qualität ausreichend.
- Die geologischen Verhältnisse in den Untersuchungsgebieten (Untertagebergwerke) unterscheiden sich im Hinblick auf die Deckgebirgsmächtigkeit.
- Das Untertagebergwerk ist hydraulisch von der Umgebung isoliert, um äußere Einflüsse auf den Grubenwasseranstieg (z. B. Wasserhaltungsmaßnahmen in benachbarten Untertagebergwerken) zu minimieren.

Die geologischen Verhältnisse in den Untersuchungsgebieten sowie die Grubenwasseranstiege werden im Detail im Abschnitt 5 beschrieben.

2.1.2 Festlegung des Untersuchungsumfanges

Es werden zunächst sämtliche hydrogeologischen und bergbaulichen Faktoren gesammelt, die einen möglichen Einfluss auf den Grubenwasseranstieg nehmen könnten. Diese Faktoren werden im Abschnitt 4.2 und Abschnitt 4.3 deskriptiv beschrieben. Für die detaillierte modellgestützte Untersuchung werden dann diejenigen Faktoren ausgewählt, für die

- aus empirischer Erfahrung eine nachweisbare Einflussnahme auf den Grubenwasseranstieg angenommen wird,
- Daten hinsichtlich Quantität und Qualität verfügbar sind und/oder
- Wertespannbreiten mittels rechnerischer Ansätze ermittelt werden können.

Abschnitt 2.2 – Bestimmung der Wertespannbreiten

Diese Kriterien werden für die vier Faktoren „Durchlässigkeitskoeffizient“ (Abschnitte 4.2.2 und Abschnitt 6.4.2), „flächenspezifische vertikale Infiltrationsspende“ (Abschnitt 4.2.4 und Abschnitt 6.4.3), „bergmännisch geschaffenes Resthohlraumvolumen“ (Abschnitt 4.3.2 und Abschnitt 6.4.4) und „Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs“ (Abschnitt 4.3.5 und Abschnitt 6.4.5) erfüllt.

2.1.3 Datenerhebung und -grundlage

Messdaten wurden von der Abteilung GPK (Grubenwasser, Planung, Konzepte) der RAG AG (Herne) und der Abteilung Hydrogeologie und Wasserwirtschaft der DMT GmbH & Co. KG (Essen) bereit gestellt (Tabelle 3). Eigene Messungen erfolgten nicht.

Tabelle 3: Verwendete Messdaten.

Messdaten	Bereitsteller
Messungen der Grubenwasser(druck)fläche in Schächten	RAG AG
Teufenspezifische (Rest-)Hohlraumvolumina der Grubengebäude	RAG AG, DMT GmbH & Co. KG
Zuflussraten ins Grubengebäude	DMT GmbH & Co. KG
Grubenwasserheberaten, Abflussrate des Dickenberger Stollens	DMT GmbH & Co. KG
Abbaupolygone	DMT GmbH & Co. KG

Hydrogeologische und bergbauliche Grundlageninformationen sind unveröffentlichten Berichten der RAG AG und DMT GmbH & Co. KG sowie frei zugänglicher Literatur (Fachbücher und -zeitschriften) entnommen. Sämtliche Quellen sind im Text markiert und im Literatur und Quellenverzeichnis (Abschnitt 10) zusammengestellt

2.2 Bestimmung der Wertespannbreiten

Die Sensitivität des analytischen Modells wird durch die systematische Variation ausgewählter Modelleingangsdaten (Faktoren) getestet. Während für die Faktoren „Durchlässigkeitskoeffizient“ (Abschnitt 6.4.2) und „bergmännisch geschaffenes Resthohlraumvolumen“ (Abschnitt 6.4.4) Angaben aus der Literatur oder aus Datensätzen vorliegen und verwendet werden, fehlen konkrete Werte zu der Infiltrationsrate (bzw. der flächenbezo-

genen vertikalen Infiltrationsspende) und der Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs. Aus diesem Grunde werden diese Werte mittels hydrogeologischer Berechnungsformeln ermittelt (flächenspezifische vertikale Infiltrationsspende in Abschnitt 6.4.3 und Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs in Abschnitt 6.4.5). Die Wertespannbreiten der Faktoren in diesen Berechnungsformeln sind diversen Dokumentationen entnommen und daher belegbar. Die Grundlagen und Vorgehensweisen bei der Berechnung werden im Abschnitt 6.4 detailliert erläutert.

2.3 Analytisches Modell

Die Grubenwasseranstiege und die Zuflussraten werden mittels eines analytischen Modells berechnet, welches auf Basis analytischer Methoden der Grundwasserdynamik entwickelt wurde. Die eigene Konzeptvorstellung (Modellaufbau, -randbedingungen, Verteilung der Modelleingangsdaten) setzte Herr Prof. Dr. Dmitry V. Rudakov (Dnipro University of Technology [Ukraine]; im Folgenden mit „Rudakov“ abgekürzt) softwaretechnisch in Delphi (V. 6, Borland [heute Embarcadero Technologies]) um. Er entwickelte dafür den Code, welcher auf Object Pascal basiert. Rudakov führte ebenfalls die vorgegebenen Varianten im analytischen Modell aus. Der Aufbau und die Vorgehensweise bei der Modellierung sind in dem Abschnitt 6.1 und Abschnitt 6.2 ausführlich beschrieben.

2.4 Sensitivitätsanalyse

2.4.1 Bestimmung der Abweichung zwischen den Zeitreihen der berechneten und gemessenen Daten

Das analytische Modell reagiert unterschiedlich sensitiv auf die Variation der untersuchten Faktoren. Die Höhe der Sensitivität spiegelt sich in einer Abweichung der Modellkurve der jeweiligen Variante von der sogenannten Basisvariante wider (Abschnitt 7.1; Anhang 14). Die Basisvariante beschreibt dabei die Variante mit der minimalen Abweichung von der tatsächlichen Messkurve und wird daher mit dieser gleichgesetzt. Diese Gleichsetzung ist für die Berechnung der Abweichungen erforderlich (Gleichung 1 bis Gleichung 4). Je höher die (absolute bzw. relative) Abweichung der Modellkurve einer Variante von der Kurve der Basisvariante ist, desto höher ist die Modellsensitivität auf die Veränderung des jeweiligen Faktors oder Terms. Aus mathematischer Sicht drückt sich die Sensitivität als mittlere (absolute oder relative) Abweichung der Differenzen zwischen der Zeitreihe der Basisvariante und der der jeweiligen Modellkurve aus (Grubenwasser[druck]fläche: Gleichung 1 und Gleichung 2. Zuflussrate: Gleichung 3 und Gleichung 4).

Grubenwasser(druck)fläche

$$d_{\text{absolut}} = \sqrt{\frac{1}{N_W - 1} \sum_{j=1}^{N_W} (h_{\text{Gbw},j,V} - h_{\text{Gbw},j,BV})^2} \quad 1$$

$$d_{\text{relativ}} = \frac{d_{\text{absolut}}}{h_{\text{Gbw},\text{akt}} - h_{\text{Gbw},0}} \times 100 \quad 2$$

mit

- d_{absolut} = mittlere (absolute) Abweichung zwischen den Zeitreihen der Mess- und Modellkurve (m),
- N_W = Anzahl der (Mess-)Werte (1),
- $h_{\text{Gbw},j,V}$ = modellierte (berechnete) Grubenwasser(druck)fläche einer Variante zum Zeitpunkt t_j (m NHN),
- $h_{\text{Gbw},j,BV}$ = modellierte (berechnete) Grubenwasser(druck)fläche der Basisvariante zum Zeitpunkt t_j (m NHN),
(Anm.: diese Variante weist die minimale Abweichung von der tatsächlichen [gemessenen] Grubenwasser[druck]fläche auf)
- d_{relativ} = mittlere (relative) Abweichung der Differenz zwischen Mess- und Modellkurve (%),
- $h_{\text{Gbw},\text{akt}}$ = aktuelle Grubenwasser(druck)fläche (m NHN),
- $h_{\text{Gbw},0}$ = Grubenwasser(druck)fläche zu Beginn des Grubenwasseranstiegs (m NHN).

Zuflussrate

$$d_{\text{absolut}} = \dot{V}_{\text{Zufluss},j,V} - \dot{V}_{\text{Zufluss},j,BV} \quad 3$$

$$d_{\text{relativ}} = \frac{d_{\text{absolut}}}{\dot{V}_{\text{Zufluss},0}} \quad 4$$

mit

- d_{absolut} = mittlere (absolute) Abweichung zwischen den Zeitreihen der Mess- und Modellkurve (m),
- $\dot{V}_{\text{Zufluss},j,V}$ = modellierte (berechnete) Zuflussrate einer Variante zum Zeitpunkt t_j (m³/min),
- $\dot{V}_{\text{Zufluss},j,BV}$ = modellierte (berechnete) Zuflussrate der Basisvariante zum Zeitpunkt t_j (m NHN),
(Anm.: die Variante weist die minimale Abweichung von der tatsächlichen [gemessenen] Zuflussrate auf),
- d_{relativ} = mittlere (relative) Abweichung zwischen den Zeitreihen der Mess- und Modellkurve (%),
- $\dot{V}_{\text{Zufluss},0}$ = Zuflussrate zu Beginn des Grubenwasseranstiegs (m³/min).

2.4.2 Partielle Differentialrechnung

Eine grundlegende Vorgehensweise in der Differentialrechnung ist die Ableitung einer Funktion f an einer beliebigen Stelle x_0 (bezeichnet als $f'[x_0]$; eindimensionale Differentialrechnung). Aus geometrischer Sicht definiert das Ergebnis der Ableitung die Steigung einer linearen Funktion (Tangente) in der Umgebung der betrachteten Stelle (x_0 ; $f'[x_0]$) der Ursprungsfunktion $f(x_0)$. Die sogenannte Ableitungsfunktion beschreibt somit die lokalen Veränderungen einer Funktion und bestimmt die momentane Änderungsrate, wenn sich die Variable x um einen beliebigen Betrag Δx verändert.

Für eine quadratische Ursprungsfunktion gilt die nachfolgende Ableitungsfunktion an einer beliebigen Stelle x_0 :

Ursprungsfunktion

$$f: x_0 \rightarrow x_0^2 + 2x_0 + \varepsilon$$

Erste Ableitungsfunktion

$$f'(x_0) = 2x_0 + 2$$

5

Eine Funktion kann auch die Veränderung einer Größe durch mehrere voneinander unabhängigen Variablen beschreiben (z. B. $f[x_0, y_0]$; mehrdimensionale Differentialrechnung). Um die Veränderung der Funktion in die Richtung nur einer Koordinatenachse (d. h. infolge der Änderung von nur einer Variablen [z. B. x_0]) zu betrachten, wird die Funktion $f(x)$ partiell, d. h. nach nur einer Variablen, abgeleitet (partielle Ableitung). Die Werte der anderen Variablen werden währenddessen konstant gehalten. Dadurch wird die partielle Ableitung zu einer Funktion mit nur noch einer Variablen.

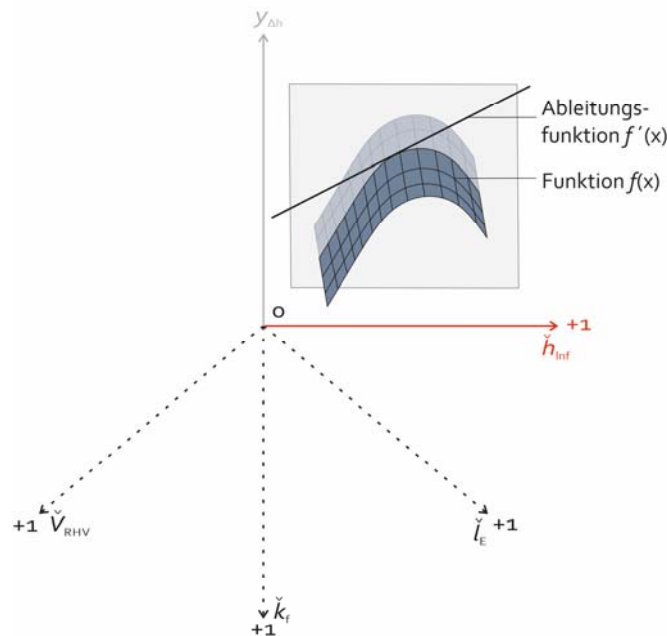


Abbildung 4: Vierdimensionales Koordinatensystem, in dem lediglich die Variable \check{h}_{Inf} variiert wird (rot gefärbte Achse), während die übrigen Variablen (gestrichelte Achsen) konstant gehalten werden. Der besseren Übersicht halber sind die negativen Achsen-abschnitte (0 bis -1) nicht dargestellt.

Die Anzahl der partiellen Ableitungen ergibt sich aus der Anzahl an Variablen. Die partiellen Ableitungen beispielsweise einer quadratischen Funktion mit zwei Variablen lauten wie folgt:

$$f: x_0, y_0 \rightarrow x_0^2 + 2x_0 + y_0^2 + 4y_0 + \varepsilon$$

$$\frac{\partial f(x_0, y_0)}{\partial x_0} = 2x_0 + 2$$

6

$$\frac{\partial f(x_0, y_0)}{\partial y_0} = 2y_0 + 4$$

Die partielle Ableitung einer quadratischen Funktion (Gleichung 6) ergibt eine lineare Funktion, deren Ergebnis $f'(x_0)$ bzw. $f'(y_0)$ von dem eingesetzten Wert der Variablen x_0 bzw. y_0 abhängig ist.

In einer mehrdimensionalen Funktion kann eine Variable an einer bestimmten oder bekannten Stelle (z. B. $y_0 = 0$) festgestellt werden (Gleichung 7; Abbildung 4; hier am Beispiel von vier Variablen). Es gilt dann:

$$f'(x_0, 0) = g(x_0) \quad 7$$

In diesem Fall wird in einem System, das aus mehr als einer unabhängigen Variablen besteht, die Veränderung im Umfeld des festgelegten Punktes untersucht, wenn lediglich die unabhängige Variable, nach der abgeleitet wird, verändert wird.

Ist das Ergebnis der partiellen Ableitung $f'(x_0)$ nicht nur an einer festgelegten Stelle x_0 gesucht, sondern stattdessen der Durchschnittswert dieser Funktion innerhalb eines Intervalls, ist der Mittelwertsatz der Integralrechnung anzuwenden. Die Anzahl der erforderlichen Integrationen gibt die Anzahl der untersuchten Variablen vor. Für eine Variable x und ein Intervall $a < x < b$ lautet der Mittelwertsatz der Integralrechnung wie folgt:

$$f'(x) = \frac{1}{b-a} \int_a^b f'(x) dx = \frac{1}{b-a} f(x) \Big|_a^b \quad 8$$

Die Lösung des Mittelwertsatzes der Integralrechnung ist im Anhang 13 ausführlich dargestellt.

3 Grundlagen der statistischen Versuchsplanung

3.1 Verwendete Software

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Statistiksoftware MODDE Pro 12.1 der Fa. Sartorius Stedim Data Analytics AB (Malmö, Schweden) genutzt. Es handelt sich dabei um eine spezielle Software für die Durchführung und Auswertung der statistischen Versuchsplanung (Abschnitt 1.3.3). Die Bedienung orientiert sich grundsätzlich an den Empfehlungen in ERIKSSON et al. (2008) und wird im Folgenden zusammenfassend beschrieben. Auf eine Einzelzitation wird daher in den folgenden Abschnitten verzichtet. Ergänzend hinzugezogene Quellen werden gesondert zitiert.

3.2 Versuchsplanung

3.2.1 Auswahl der experimentellen Zielsetzung

Die Statistiksoftware MODDE Pro 12.1 bietet je nach Aufgabenstellung die folgenden drei experimentellen Zielsetzungen:

- **Selektion** (engl. Screening): dient zu Beginn einer Versuchsauswertung, die Faktoren mit dem höchsten Einfluss auf einen Prozess zu identifizieren. Es liegen noch wenige Informationen über die Faktoren und deren Höhe auf die Einflussnahme auf die Zielgröße vor. Die geeignete Wertespannbreite ist festzulegen, die einem Versuch zugrunde liegen sollte. Das Ziel ist es, die Anzahl der möglichen Faktoren auf diejenigen zu reduzieren, die einen erkennbaren Einfluss auf die Zielgröße ausüben. Die Auswahl der zu untersuchenden Faktoren ist größer und die Anzahl der Versuche geringer als bei der experimentellen Zielsetzung „Optimierung“ (folgender Punkt). Für die Auswertung werden Beschreibungsmodelle mit linearen und wechselwirkenden Termen zugrunde gelegt.
- **Optimierung** (engl. Optimiziation): dient, die Höhe der Einflussnahme eines Faktors zu konkretisieren. Ebenso wird die Faktorenkombination identifiziert, die den optimalen Einsatzbereich vorgibt. Eine Kenntnis über die Wirkung der Faktoren auf die Zielgröße liegt nun vor. Diese experimentelle Zielsetzung schließt sich daher an der Selektion der wichtigen Einflussgrößen an. Dieser Ansatz zeichnet sich durch eine geringere Anzahl an zu untersuchenden Faktoren und durch mehr Versuche aus. Für die Auswertung werden quadratische und kubische Beschreibungsmodelle zugrunde gelegt.

- **Prüfung der Störungsunempfindlichkeit** (engl. Robustness testing): dient der Bestimmung der Sensitivität eines Prozesses auf kleinste Faktorenvariation sowie der Bestimmung des Einflusses von nur gering einflussnehmender Faktoren auf einen Prozess. Die Prüfung der Störungsempfindlichkeit ist in der Regel der letzte Schritt einer Versuchsauswertung z. B. vor der Veröffentlichung eines Produkts.

Im Rahmen dieser Arbeit findet das sogenannte Screening Anwendung. Auf eine weiterführende detaillierte Untersuchung (Optimierung, Prüfung der Störungsunempfindlichkeit) wird nicht eingegangen.

3.2.2 Definition der Faktoren

Nach Festlegung der experimentellen Zielsetzung (Abschnitt 3.2) sind die Faktoren zu definieren. Diese sind zu benennen und mit einer Einheit zu versehen. Für jeden Faktor sind zwei Stufen festzulegen, die die obere und untere Grenze einer zu untersuchenden Wertespannbreite vorgeben. Die Wertespannbreite muss realistisch und begründet sein. Die Herleitung und Festlegung der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Wertespannbreiten werden in Abschnitt 6.4 beschrieben.

Durch Kodierung (z. B. – und +, –1 und +1) wird die Schreibweise der Stufen vereinheitlicht und in kompakter Weise dargestellt (Tabelle 4; SIEBERTZ et al. 2017). Die Wirkung eines Faktors auf einen Prozess (Effekt) hängt wesentlich von den Abständen zwischen den Stufen ab, d. h. je größer der Abstand ist, desto höher sollte der Effekt durch eine Faktorvariation sein. Im Gegensatz dazu können zu gering gewählte Stufenabstände nur geringe Unterschiede in den Effekten bewirken.

3.2.3 Definition der Effekte

In Versuchen wird die Wirkung eines Faktors auf ein System untersucht. In der statistischen Versuchsplanung werden diese Ergebnisse als Effekte bezeichnet. Diese Effekte sind zu benennen und mit einer Einheit zu versehen.

3.2.4 Auswahl eines Versuchsplans

Die Software MODDE Pro 12.1 bietet unter Beachtung der Anzahl der Faktoren, deren Stufen sowie der ausgewählten experimentellen Zielsetzung eine Vielzahl unterschiedlicher Versuchspläne (siehe linke Spalte in Abbildung 5), die zur Lösung der Fragestellung geeignet sind. Die Versuchspläne nutzen unterschiedliche Beschreibungsmodelle (linear, quadratisch, kubisch, wechselwirkend; siehe auch Gleichung 10 bis Gleichung 13).

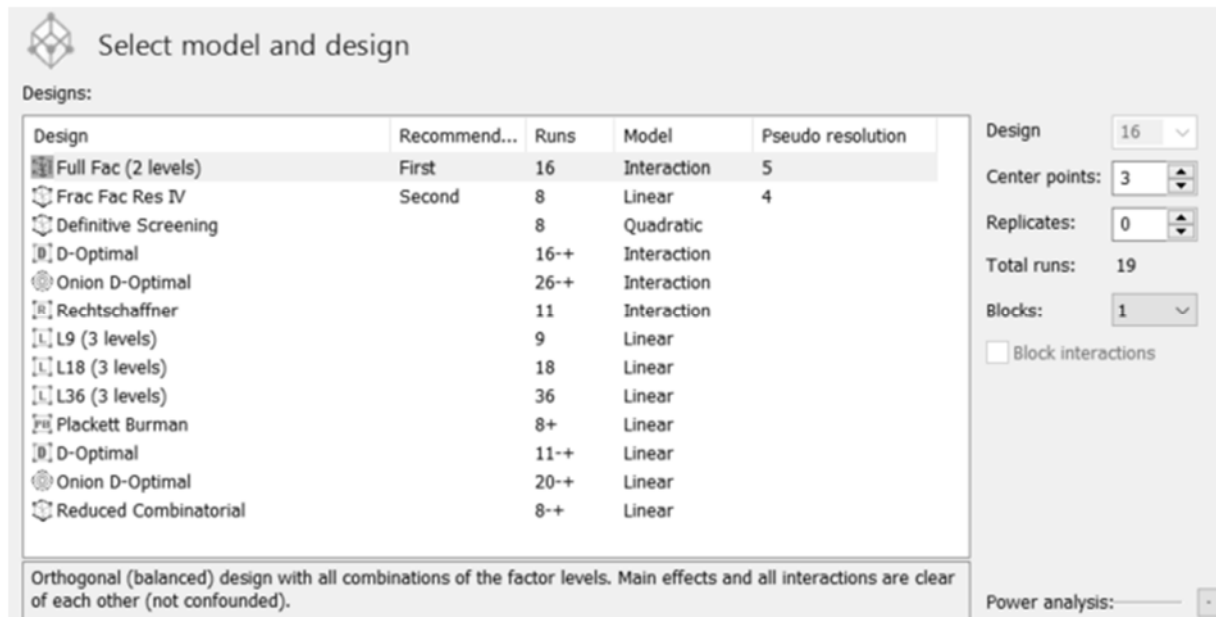


Abbildung 5: Auswahlmöglichkeiten von Versuchsplänen (Design) und Beschreibungsmodellen (Model; Ausschnitt aus der verwendeten Statistiksoftware MODDE Pro 12.1).

Die Anzahl der durchzuführenden Versuche ergibt sich aus dem gewählten Versuchsplan (siehe mittlere Spalte in Abbildung 5). Lineare Beschreibungsmodelle benötigen eine geringere Anzahl an Versuchen als quadratische oder wechselwirkende.

Ein häufig angewendeter Versuchsplan in der statistischen Versuchsplanung ist der faktorielle Ansatz, in dem entweder sämtliche Kombinationen der festgelegten Stufen (vollständiger faktorieller Versuchsplan) oder nur ausgewählte Kombinationen (reduzierter faktorieller Versuchsplan) gebildet und ausgeführt werden (Abbildung 5).

Im vorliegenden Bericht wird der vollständige faktorielle Versuchsplan gewählt. Dieser Ansatz prüft ebenso die Wechselwirkungen zwischen den Termen. Die Anzahl der erforderlichen Versuche, d. h. der Versuchsaufwand, bei einem vollständigen faktoriellen Ansatz ergibt sich in Abhängigkeit von der Anzahl der Stufen N_S und der Faktoren N_X (Gleichung 9).

$$\text{Anzahl der Versuche} = N_S^{N_X} \quad 9$$

mit

N_S = Anzahl der Stufen (1),
 N_X = Anzahl der Faktoren (1).

Bei zwei Stufen (+ und –) ergeben sich folgende vollständige faktorielle Versuchspläne in Abhängigkeit von der Anzahl der Faktoren (siehe Versuchsnummern 1 bis 16 in Tabelle 4).

Tabelle 4: Versuchspläne für bis zu vier Faktoren.

2 ⁴ -Versuchsplan				
2 ³ -Versuchsplan				Faktor X ₄
2 ² -Versuchsplan			Faktor X ₃	
Versuchsnummer	Faktor X ₁	Faktor X ₂		
1	–	–		
2	+	–		
3	–	+		
4	+	+		
5	–	–	+	–
6	+	–	+	–
7	–	+	+	–
8	+	+	+	–
9	–	–	–	+
10	+	–	–	+
11	–	+	–	+
12	+	+	–	+
13	–	–	+	+
14	+	–	+	+
15	–	+	+	+
16	+	+	+	+
17	0	0	0	0
18	–	0	0	0
19	+	0	0	0
20	0	–	0	0
21	0	+	0	0
22	0	0	–	0
23	0	0	+	0
24	0	0	0	–
25	0	0	0	+

Der Versuchsplan wird durch einen Versuch ergänzt, in dem für alle Faktoren der jeweils mittlere Wert zwischen der unteren und oberen Stufe genutzt wird (optimaler Wert, 0; siehe Versuchsnummer 17 in Tabelle 4). Dieser wird auch „Wiederholungsversuch“ (Replicate) genannt (ERIKSON et al. 2008).

Wird die Beziehung zwischen den Faktoren und Effekten durch eine lineare Beziehung nur unzureichend beschrieben, ist die Modellqualität – angezeigt durch den R^2 - und Q^2 -Wert – gering (Abschnitt 3.3.4). Zur Beschreibung nicht-linearer (z. B. quadratischer) Beziehungen können weitere Versuche ergänzt werden. Für jeden zu untersuchenden Faktor werden zwei neue Versuche ergänzt, bei dem zwischen den beiden Stufen (+ und –) des jeweiligen Faktors variiert wird, während der optimale Wert für die anderen Faktoren genutzt wird (siehe Versuchsnummern 18 bis 25 in Tabelle 4). Die zusätzlichen Versuche ergänzen in dem Beschreibungsmodell die quadratischen Terme der jeweiligen Faktoren (Gleichung 12 und Gleichung 13).

Auf eine Erläuterung aller weiteren zur Verfügung stehender Beschreibungsmodelle wird an dieser Stelle verzichtet und stattdessen auf die Erläuterungen in ERIKSSON et al. (2008) verwiesen.

3.2.5 Signifikanzbewertung

Ein Ergebnis der statistischen Versuchsplanung ist die Bestimmung der Regressionskoeffizienten eines (linearen oder nicht-linearen) multiplen Beschreibungsmodells. Anhand dieser Regressionskoeffizienten lässt sich die Wirkstärke eines Terms ableiten. Die Einflussnahme eines Terms gilt als unsicher und nicht-signifikant, wenn die Länge des Vertrauensbereichs (Konfidenzintervall) den Wert des Regressionskoeffizienten übersteigt (Abbildung 6; ERIKSSON et al. 2008). Folglich ist beim nachfolgenden Beispiel der linke Faktor signifikant, während der rechte Faktor hingegen als nicht-signifikant zu werten ist (Abbildung 6).

Ein Maß der statistischen Wahrscheinlichkeit ist der p -Wert (Signifikanzwert, probability-Wert). Der p -Wert wird automatisch durch die verwendete Statistiksoftware bestimmt. Der Signifikanzwert bewertet, ob die sogenannte Nullhypothese (hier: zwischen den Faktoren und Effekten besteht kein signifikanter Zusammenhang) stimmt (FISHER 1935). Wird die Nullhypothese widerlegt (also: zwischen den Faktoren und Effekten besteht ein signifikanter Zusammenhang), unterschreitet der p -Wert ein festgelegtes Signifikanzniveau (z. B. $< 0,05$). Der p -Wert nicht-signifikanter Terme überschreitet dieses Signifikanzniveau (z. B. $> 0,05$).

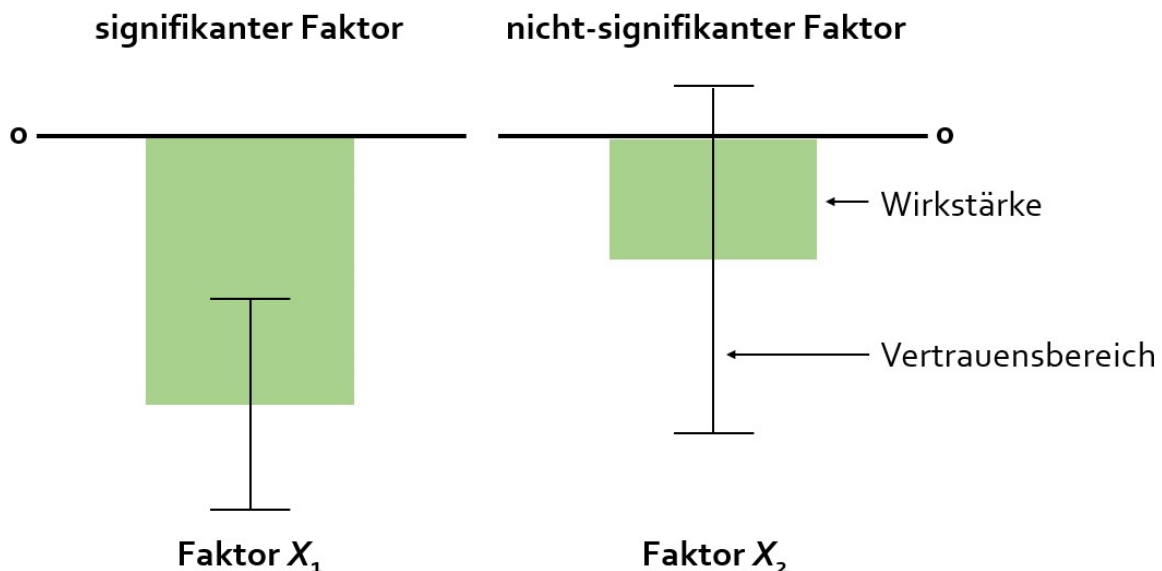


Abbildung 6: Vergleich eines signifikanten (links; Länge des Vertrauensbereichs < Wert des Regressionskoeffizienten) und nicht-signifikanten Terms (rechts; Länge des Vertrauensbereichs > Wert des Regressionskoeffizienten).

Der Ausschluss nicht-signifikanter Terme vereinfacht das Beschreibungsmodell. Dazu identifiziert die Statistiksoftware den Term mit dem höchsten p -Wert ($> 0,05$) und prüft dann, ob dessen Ausschluss für die weitere Auswertung durch Neuberechnung des Beschreibungsmodells unter Zugrundelegung der reduzierten Anzahl an Faktoren zu einer Erhöhung des Q^2 -Wertes führt. Erhöht sich der Q^2 -Wert, so wird dieser Term ausgeschlossen und der nächste Term mit dem nun höchsten p -Wert geprüft. Die automatische Prüfung ist abgeschlossen, sobald alle Terme mit p -Werten größer 0,05 geprüft sind und es zu keiner Verbesserung des Q^2 -Wertes kommt.

3.3 Statistische Bewertung des Beschreibungsmodells

3.3.1 Darstellung der Verteilung

Die Werte der (abhängigen) Ausgangsvariablen (Effekte) aller Versuche können als Punkte auf der Ordinate dargestellt werden. Dadurch wird die Variabilität der Effekte der einzelnen Versuche (grüne Punkte in Abbildung 7) sowie der Wiederholungsversuche (blaue Punkte in Abbildung 7) veranschaulicht und Ausreißer können dadurch identifiziert werden. Die Effekte der Wiederholungsversuche sollten eine deutlich geringe Variabilität aufweisen als die der Versuche.

Abschnitt 3.3 – Statistische Bewertung des Beschreibungsmodells

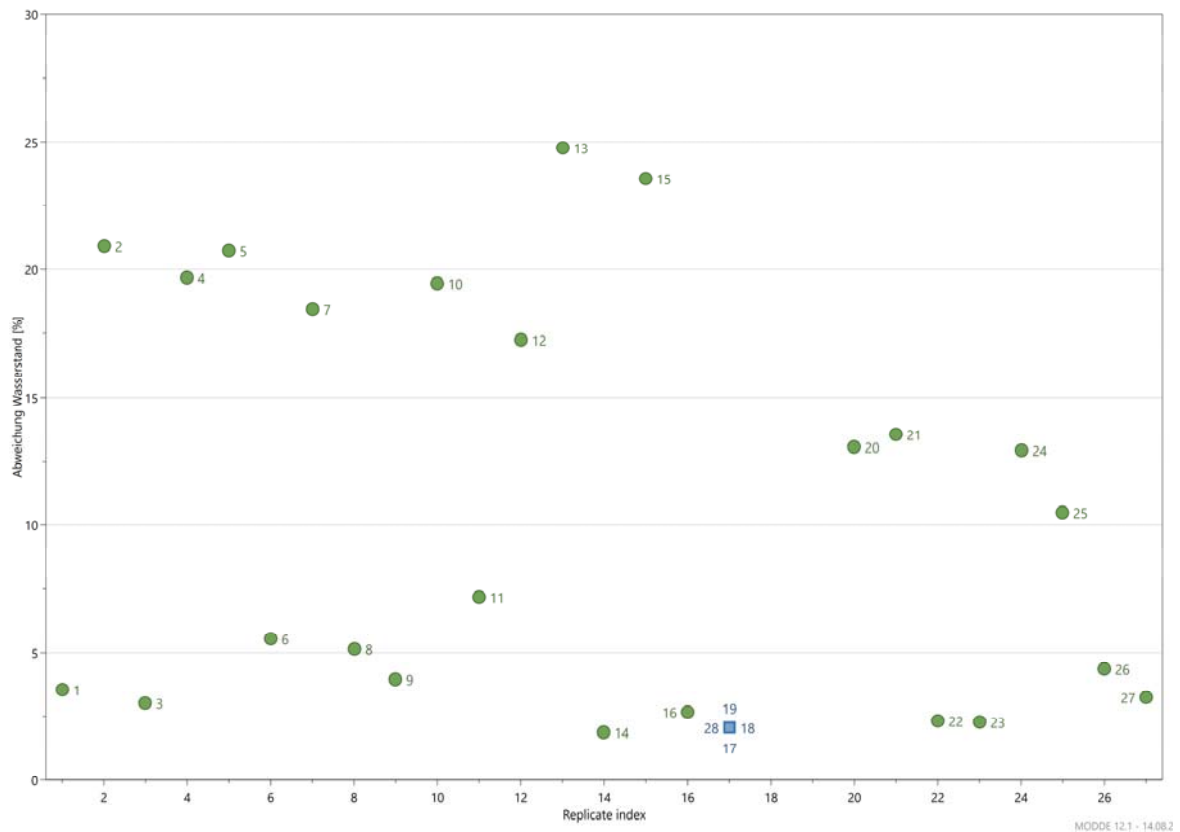


Abbildung 7: Darstellungsmöglichkeit der Variabilität der Effekte (Ausschnitt aus der verwendeten Statistiksoftware MODDE Pro 12.1).

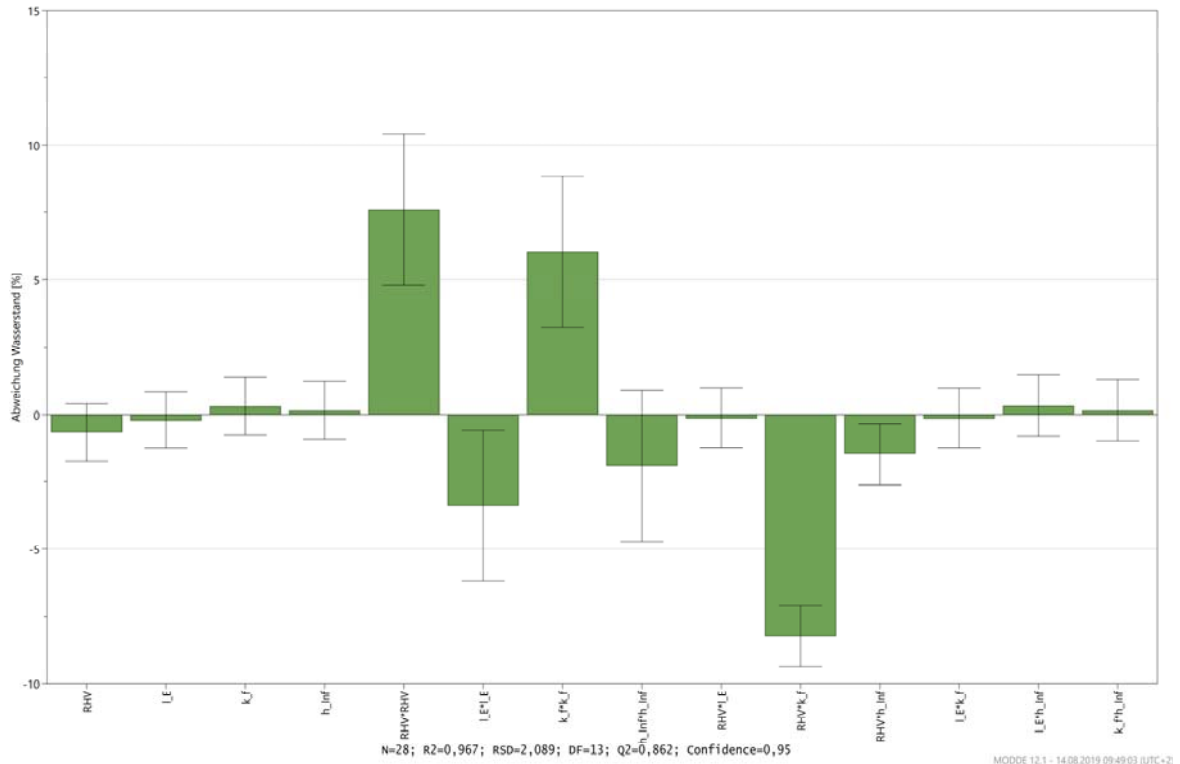


Abbildung 8: Darstellungsmöglichkeit der Koeffizienten (Ausschnitt aus der verwendeten Statistiksoftware MODDE Pro 12.1).

3.3.2 Darstellung der Koeffizienten

Die Länge der Säule gibt für jeden Faktor (und dessen quadratischen und wechselwirkenden Termen) die Höhe der Einflussnahme auf einen Prozess wieder (Abschnitt 3.2.5). Je länger die Säule ist, desto größer ist die Einflussnahme des jeweiligen Faktors. Die Skalierung auf der Ordinate gibt die Höhe der Änderung des Effekts an, wenn der Wert des Faktors von dem mittleren Wert (o) auf die höhere Stufe (+) geändert wird. Die anderen Faktoren (und Terme) bleiben dabei unverändert.

3.3.3 Multiple Regression (Beschreibungsmodell)

Der funktionale Zusammenhang zwischen einem oder mehreren Faktoren (unabhängige Variable) und einer Zielgröße (abhängige [Ausgangs-]Variable) wird mittels eines Beschreibungsmodells beschrieben (STAHEL 2009; BACKHAUS et al. 2015; SIEBERTZ et al. 2017). Diese werden vor allem dann verwendet, wenn ein Zusammenhang quantitativ beschrieben oder Werte der abhängigen Ausgangsvariable prognostiziert werden soll (FAHRMEIR et al. 2009). Die Gerade (oder Kurve) der Funktion soll möglichst nahe an den gegebenen Datenpunkten verlaufen. Der einfachste Ansatz ist das lineare Beschreibungsmodell mit einem Faktor, bei der ein linearer Zusammenhang zwischen einem Faktor und der Zielgröße besteht (einfache Regression). Zusammenhänge mit mehreren Faktoren werden durch die multiple Regression beschrieben. Besteht ein solcher linearer Zusammenhang hingegen nicht, ist ein nicht-lineares Beschreibungsmodell anzuwenden.

Das zugrundeliegende Beschreibungsmodell wird durch die Wahl des Versuchsplans vorgegeben (Abschnitt 3.2.4; SIEBERTZ et al. 2017). Dieses erklärt nicht das physikalische Phänomen. Dafür werden die Zusammenhänge zwischen den Faktoren und der Zielgröße bestimmt (SIEBERTZ et al. 2017). Neben linearen (Gleichung 10) und quadratischen Zusammenhängen zwischen den Faktoren und der Zielgröße (Gleichung 12) existieren oftmals auch Wechselwirkungseffekte zwischen den Faktoren untereinander (Gleichung 11; Gleichung 13). Die folgenden Beschreibungsmodelle finden Verwendung:

Lineares Beschreibungsmodell:

$$y = K_0 + K_1X_1 + K_2X_2 + \dots + \varepsilon \quad 10$$

Wechselwirkendes Beschreibungsmodell:

$$y = K_0 + K_1X_1 + K_2X_2 + K_{12}X_1X_2 + \dots + \varepsilon \quad 11$$

Quadratisches Beschreibungsmodell:

$$y = K_0 + K_1X_1 + K_2X_2 + K_{11}X_1^2 + K_{22}X_2^2 + \dots + \varepsilon \quad 12$$

Gemischtes Beschreibungsmodell:

$$y = K_0 + K_1X_1 + K_2X_2 + K_{12}X_1X_2 + K_{11}X_1^2 + K_{22}X_2^2 + \dots + \varepsilon \quad 13$$

mit

y	=	Zielgröße, zu analysierende (abhängige) Ausgangsvariable (Effekt),
K_m	=	Modellkonstante oder Koeffizient (Wirkstärke) eines Faktors oder Terms, der zur Anpassung des Beschreibungsmodells ermittelt werden muss (1),
$X_{m,n}$	=	unabhängiger Faktor, der die zu analysierende Ausgangsvariable beeinflusst (1),
ε	=	Abweichung oder Fehler, der den Teil des zu beschreibenden Prozesses darstellt, der nicht durch das gewählte Beschreibungsmodell erklärt werden kann (bei guten Modellen ist der Wert der Abweichung klein; 1).

Der Grad der Terme in dem Beschreibungsmodell (z. B. X^1 [linear], X^2 [quadratisch], X^3 [kubisch]) hängt von dem Abstand der Stufen ab (Abschnitt 3.2.2; SCHEFFLER 1997). Ist der Abstand zwischen den Stufen gering, so ist oftmals eine Funktion ersten Grades ausreichend (Gleichung 10). Ist der Abstand zwischen den Stufen größer, so dass die resultierende Linie oder Fläche stärker gekrümmt ist, ist ein Beschreibungsmodell mit einem höheren Grad erforderlich (Gleichung 12).

3.3.4 Statistische Kenndaten

Die Qualität eines Beschreibungsmodells wird mittels statistischer Kenndaten bewertet. Das Bestimmtheitsmaß (R^2 -Wert) dient der Bewertung, wie geeignet die unabhängigen Variablen des Beschreibungsmodells sind, die Varianz der abhängigen Ausgangsvariable zu beschreiben. Je höher dieser Wert ist, desto höher ist die Güte der Anpassung. Der R^2 -Wert reicht von 0 (unbrauchbares Beschreibungsmodell) bis 1 (perfekte Modellanpassung). Das Vorhersagemaß (Q^2 -Wert) dient hingegen der Bewertung, wie geeignet das Beschreibungsmodell ist, Prognosen für die abhängige Ausgangsvariable auf Grundlage der vorhandenen Daten zu treffen. Der Q^2 -Wert liegt ebenfalls zwischen 0 und 1. Ein gutes Beschreibungsmodell erfüllt die folgenden Kriterien:

- $R^2 > 0,5$
- $Q^2 > 0,5$
- $R^2 - Q^2 < 0,3$

4 Einflussfaktoren eines Grubenwasseranstiegs

4.1 Grund- und Grubenwasserbewegung im Steinkohlenbergwerk

4.1.1 Wasserströmung im Gebirge

Wasser kann im Gebirge nur dort strömen, wo Hohlräume (Poren, Klüfte, Karsthohlräume, aber auch anthropogen erzeugte Hohlräume und Auflockerungen) zusammenhängend vorhanden sind und ein hydraulisches Gefälle existiert. Diese beiden Voraussetzungen geben die Strömungsrichtung und -geschwindigkeit vor. Das Wasser kann dabei laminar oder turbulent strömen (JOGWICH, A. & JOGWICH, M. 2009). Bei der laminaren Strömung verlaufen die Stromlinien parallel zueinander und vermischen sich nicht. Wird die laminare Strömung gestört, verwirbeln die Stromlinien und das Wasser strömt turbulent. Der Übergang von laminarer zur turbulenten Strömung wird durch die REYNOLDS-Zahl gekennzeichnet (REYNOLDS 1883). Die REYNOLDS-Zahl ist proportional sowohl zum Korndurchmesser als auch zur Strömungsgeschwindigkeit sowie umgekehrt proportional zur kinematischen Viskosität des Fluides. Eine konkrete Zahl, die den Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung beschreibt, kann allerdings aufgrund der Fluidabhängigkeit nicht angegeben werden (WOLKERSDORFER 2008).

Wird die Wasserbewegung großräumig in einem Gebirge betrachtet, so bewegt sich das Wasser nahezu laminar (HÖLTING 1989; zitiert in JÄGER et al. 1990). Die laminare Wasserbewegung wird durch das DARCY-Gesetz (DARCY 1856) beschrieben. Henry Darcy erkannte, dass der Volumenstrom von der durchflossenen Querschnittsfläche, dem hydraulischen Gradienten und einem Koeffizienten abhängt (Gleichung 14).

$$\dot{V} = k_f \times A \times i \quad 14$$

mit

\dot{V}	=	Volumenstrom (m ³ /s),
k_f	=	Durchlässigkeitskoeffizient (m/s),
A	=	durchflossene Querschnittsfläche (m ²),
i	=	hydraulischer Gradient (mit $i = \Delta h / \Delta l$) (1).

Die Wasserströmung im Gebirge hängt von der Lithologie und der Porosität des durchflossenen Gesteins ab (Abschnitt 4.2.3). Für dessen Beschreibung müssen die Ausdehnung und Mächtigkeit lithologisch einheitlicher Schichten sowie deren Einordnung hinsichtlich ihres Vermögens, Wasser zu leiten, bekannt sein. Je nach dem Maß der Fähigkeit, Wasser zu leiten, werden Gesteinskörper in „Grundwasserleiter“, „Grundwasserhemmer“ und „Grundwassernichtleiter“ unterschieden (DIN 4049-3 1994; HÖLTING & COLDEWEY 2013).

Abschnitt 4.1 – Grund- und Grubenwasserbewegung

In (vor allem internationalen) Veröffentlichungen wird ein Untertagebergwerk auch als „mine aquifer“ bezeichnet (SAMMARCO 1995). Diese Art des Grundwasserleiters ist im besonderen Maße durch bergbauliche Aktivitäten geschaffen und zeichnet sich durch eine Kombination der typischen hydrodynamischen Eigenschaften eines Poren-, Kluft- und Karstgrundwasserleiters aus. Das Gesamtsystem wird als „triple porosity aquifer model“ beschrieben (WOLKERSDORFER 2008). Das offene Grubengebäude (wie Schächte, Strecken) repräsentieren dabei einen Karstgrundwasserleiter mit vergleichsweise großen Hohlraumvolumina. Die Klüfte und Störungen bilden den Kluftgrundwasserleiter. Das unverritzte Gebirge ist durch die Eigenschaften eines Porengrundwasserleiters gekennzeichnet. WALTER (2018) bezeichnet ein Untertagebergwerk als einen „technischen Karst“ oder „anthropogenes Karst-Analogon“. Er verweist ebenfalls auf die erhöhte hydraulische Durchlässigkeit innerhalb des Grubengebäudes sowie der weitreichenden und hydraulisch wirksamen Entwässerungsstrukturen im Untergrund.

Der untertägige Abbau bewirkt eine Auflockerung (Verritzung) des Gebirges (KRATZSCH 2013). Dadurch erhöht sich die hydraulische Gebirgsdurchlässigkeit (Abschnitt 4.2.2). Die Durchlässigkeit der Gesteine des unverritzten Untergrunds ist um ein Vielfaches geringer als die hydraulische Durchlässigkeit des offenen Grubengebäudes, in dem das Wasser nahezu widerstandslos zirkulieren kann (Abschnitt 4.2.2). Das unverritzte Gebirge nimmt hingegen während eines Grubenwasseranstiegs kaum am Wasserumsatz teil (DENNEBORG et al. 2017). Stattdessen setzt eine Wassersättigung des Gebirges erst mit einer Zeitverzögerung von z. T. mehreren Jahrzehnten bis Jahrhunderten ein. Am Beispiel des geplanten Teilanstiegs in der Wasserprovinz Haus Aden (Ruhrgebiet) von –960 m NHN auf –670 m NHN wird der Zeitraum für die vollständige Wassersättigung des Gebirges auf rd. 26 Jahren geschätzt (DENNEBORG et al. 2017). In JÄGER et al. (1990) wird berichtet, dass der Absenkungstrichter des Eisenerzbergwerks Konrad (Salzgitter, Niedersachsen) erst nach rd. 2.000 Jahren wieder aufgefüllt sei und die ursprünglichen Grundwasserverhältnisse wieder vorlägen, was neben den geringen Zuflüssen auch einen Hinweis auf das „träge“ Verhalten des Gebirges zu werten ist.

Neben den Poren und Klüften des Gebirges sowie den Auflockerungszonen bilden auch Störungszonen potenzielle Migrationswege für das ansteigende Grubenwasser (nach oben) oder für versickernde Grundwässer durch das Gebirge (nach unten). Störungen können zwei Grundwasserleiter miteinander verbinden oder neue Migrationswege in Schichten bewirken, die im natürlichen Zustand undurchlässig sind (KLEINE VENNEKATE et al. 2014); sie sind in diesen Fällen hydraulisch wirksam. Die hydraulische Wirksamkeit von Störungen ist von der Art der Störung (BALTES et al. 1998) sowie von dem Anteil an Tonmineralen in den Gesteinen abhängig, die in die Störung eingeschleppt werden (WESCHE 2017). Überschiebungen (bergmännisch „Wechsel“) mit höheren Versatzbeträgen weisen

aufgrund ihrer einengenden Bewegungen geringere bis keine Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit auf, während Abschiebungen (bergmännisch „Sprünge“) oder Horizontalverschiebungen (bergmännisch „Blättern“) durch Dehnungsvorgängen zu Auflockerungen des Gefüges und somit zu einer Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit führen. Allerdings kann die hydraulische Wirksamkeit von Störungen durch Tonverschmierungsprozesse (Mylonitisierung) innerhalb der Scherfuge auch verändert und gegenüber dem umliegenden Gebirge geringer sein (WESCHE 2017). In eine Störung eingeschleppte Tonminerale, die infolge des Kontakts mit Wasser aufquellen und die Porosität reduzieren, verringern die hydraulische Durchlässigkeit. In der Literatur werden für Störungen Durchlässigkeitskoeffizienten von $< 10^{-9}$ m/s angegeben (BRACE 1980; JOLLEY et al. 2007; WESCHE 2017).

Weiträumige Trennflächennetze (Störungen, Klüfte) können die hydraulische Verbindung weit auseinanderliegender Untertagebergwerke bewirken. Solche weitreichenden Verbindungen sind u. a. aus dem Ruhrgebiet bekannt. COLDEWEY & MÜLLER (1994) beschreiben einen rapiden Wasserstandsabfall in einem Schacht, der mit einem in etwa zeitgleichen Wassereinbruch in einem anderen, weit entfernt (> 10 km) gelegenen Untertagebergwerk korrelierte. Die möglichst genaue Kenntnis über die weiträumige Ausdehnung des Kluftnetzes sowie der Störungen ist wichtig, um den hydraulisch wirksamen Einflussbereich zu bestimmen. Innerhalb dieser Fläche fließt das Grund- und Oberflächenwasser in das Grubengebäude (Abschnitt 4.3.5).

4.1.2 Wasserströmung im Grubengebäude

Der überwiegende Anteil der Wasserströmung in einem Untertagebergwerk erfolgt im offenen Grubengebäude sowie in den aufgelockerten Bereichen im Hangenden und Liegenden der Strecken (bis zu 99 %, ECKART 2018 [persönliche Kommunikation]; WOLKERSDORFER 1996). Die Bergwerksgeometrie (z. B. räumliche Anordnung der vertikalen, horizontalen und schrägen Elemente sowie Abbaubereiche) gibt dabei die maßgeblichen Strömungswege für den Anstieg des Grubenwassers vor.

Strecken können einzelne Grubenfelder oder benachbarte Untertagebergwerke miteinander verbinden (Verbundbergwerk). Verbindungen zweier Bereiche können ebenfalls hydraulisch wirksame Bohrungen, geologische sowie tektonische Elemente (wie Störungen, Klüfte; Abschnitt 4.1.1) und wasserwegsamen Abbauannäherungen bewirken. Wird die freie Wasserströmung im Grubengebäude nicht gestört (z. B. Wasserdämme, vollständig verbrochene Strecken), herrscht im gesamten Grubengebäude gemäß des Prinzips der kommunizierenden Röhren eine nahezu einheitliche Grubenwasser(druck)fläche (siehe z. B. Bergwerk Westfalen; Abschnitt 5.5.3.2).

Die hydraulische Durchlässigkeit bzw. das hydraulische Wasserleitungsvermögen des Grubengebäudes kann sich in Abhängigkeit von der Zeit und der Teufe verändern, da gebirgsmechanische Vorgänge (z. B. Konvergenz) zu einer Reduzierung des Fließquerschnitts führen (Abschnitt 4.3.3; KRATZSCH 2013). Sollte eine Strecke gar vollständig verbrechen, bleibt erfahrungsgemäß allerdings eine ausreichend hohe hydraulische Durchlässigkeit weiter vorhanden, die eine Wasserströmung erlaubt (WOLKERSDORFER 2008).

4.1.3 Räumlich-zeitlicher Verlauf des Grubenwasseranstiegs

Die Auswertung abgeschlossener Grubenwasseranstiege zeigt ein Bild variierender Anstiegsszenarien (Abbildung 2). Gründe dafür sind die Komplexität der Bergwerksgeometrie und die hydrogeologischen Standorteigenschaften (FERNANDEZ-RUBIO 1979; WESTERMANN et al. 2018). Trotz der Variabilität können allerdings die Grubenwasseranstiege grundsätzlich in Phasen eingeteilt werden (Abbildung 9; JÄGER et al. 1990; ROSNER 2011; MELCHERS et al. 2019):

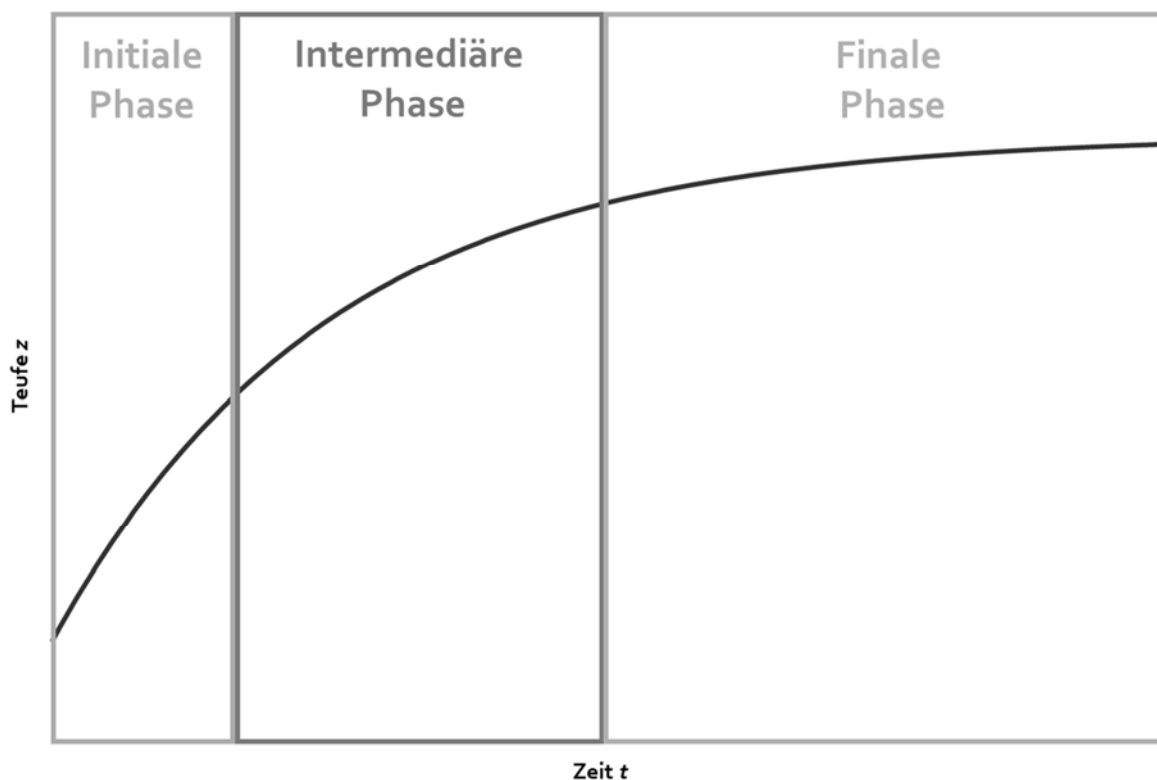


Abbildung 9: Idealisierte Kurve eines Grubenwasseranstiegs mit Phaseneinteilung (verändert nach MELCHERS et al. 2019).

Initiale Phase

Während der aktiven Gewinnungsphase wird das Grubenwasser durch temporäre und dezentrale Wasserhaltungen unter die tiefste Sohle abgesenkt. Die Bereiche unterhalb dieser tiefsten Sohle (Unterwerksbau) sind erfahrungsgemäß oftmals weniger intensiv durchbaut, so dass das flutbare Hohlraumvolumen folglich gering ist (ROSNER 2011). Nach Außerbetriebnahme oder Reduzierung der Wasserhaltung werden diese Bereiche als erstes überstaut. Die anfängliche geringe Wassersäule bewirkt nur einen geringen hydrostatischen Gegendruck auf die Zuflusspunkte, so dass die Zuflussraten in das Grubengebäude zu Beginn des Grubenwasseranstiegs erhöht sind (Tabelle 5; Abschnitt 4.2.4). Aufgrund des geringen flutbaren Hohlraumvolumens in Verbindung mit der erhöhten Zuflussrate sind die Grubenwasseranstiege in der Anfangsphase durch die maximalen Anstiegsgeschwindigkeiten gekennzeichnet. Diese betragen zeitweise oftmals (auf ein Jahr hochgerechnet) mehrere 100 m/a (Abbildung 2). Mit Erreichen der tiefsten Übertrittsstelle endet der schnelle initiale Anstieg.

Tabelle 5: Phaseneinteilung eines Grubenwasseranstiegs nach qualitativen Kriterien.

Phase	Hohlraumvolumen	Zuflussrate	Anstiegs- geschwindigkeit
initiale Phase	gering	hoch	hoch
intermediäre Phase	groß	abnehmend	mittel*
finale Phase	gering	gering	gering

** im Vergleich zur initialen und finalen Phase*

Intermediäre Phase

Sobald das Grubenwasser die tiefste Übertrittsstelle erreicht, strömt dieses lateral entlang der Strecken. Es werden nun die Hauptabbausohlen eingestaut, die ein höheres Hohlraumvolumen aufweisen als der Unterwerksbau. Die Zuläufe von tiefem Grundwasser werden sukzessive mit ansteigender Grubenwasser(druck)fläche abgedrückt (Abschnitt 4.2.4). Aus dem größeren flutbaren Hohlraumvolumen sowie der abnehmenden Zuflussrate verringert sich die Anstiegsgeschwindigkeit (Tabelle 5). Diese betragen in der Regel weniger als (auf ein Jahr hochgerechnet) 100 m/a (Abbildung 2; MELCHERS et al. 2019). Ist das Grubengebäude hydraulisch überstaut bzw. erreicht die Grubenwasser(druck)fläche die Basis des Deckgebirges, so verändern sich die Anstiegsgeschwindigkeiten. Handelt es sich um ein (sehr) schwach durchlässiges Deckgebirge, nehmen die An-

stiegsgeschwindigkeiten zu (Abschnitt 5.4.3.2 und Abschnitt 5.5.3.2). Bietet das Deckgebirge hingegen eine ausreichende Wasseraufnahmekapazität, so reduziert sich die Anstiegsgeschwindigkeit weiter und die Grubenwasseranstiegskurve flacht ab (Tabelle 5).

Finale Phase

Ein Grubenwasseranstieg endet, sobald das Grubenwasser das Niveau des tiefsten Entwässerungstollens erreicht oder sich ein quasi-stationäres Gleichgewicht zwischen dem Ab- und Zufluss von Wasser einstellt. Vernässungserscheinungen an der Tagesoberfläche können auftreten, wenn das natürliche Niveau der Grubenwasser(druck)fläche oberhalb der Tagesoberfläche liegt (z. B. Steinkohlenrevier Dresden-Gittersee in MANN & WEDEKIND 2010).

4.1.4 Mathematische Funktion der idealisierten Grubenwasseranstiegskurve

Die idealisierte Kurve eines Grubenwasseranstiegs kann mathematisch durch eine Sättigungsfunktion beschrieben werden (Abbildung 9; MELCHERS et al. 2019). Diese Funktion ist für hydraulisch isolierte Untertagebergwerke anwendbar (Gleichung 15).

$$h_{\text{Gbw},j} = \Delta h_{\text{Gbw}} \times (1 - e^{-\beta \times t}) \quad 15$$

mit

$h_{\text{Gbw},j}$	=	Grubenwasser(druck)fläche zum Zeitpunkt t_j (m NHN),
Δh_{Gbw}	=	Differenz zwischen der aktuellen Grubenwasser(druck)fläche und der Grubenwasser(druck)fläche zu Beginn des Grubenwasseranstiegs (m), mit $\Delta h_{\text{Gbw}} = h_{\text{Gbw,akt}} - h_{\text{Gbw,o}}$ $h_{\text{Gbw,akt}}$ = aktuelle Grubenwasser(druck)fläche (m NHN), $h_{\text{Gbw,o}}$ = Grubenwasser(druck)fläche zu Beginn des Grubenwasseranstiegs (m NHN),
β	=	kinetischer Parameter (1/d),
t	=	Zeit (d).

Diese Funktion beschreibt beschränkte Wachstumsprozesse. Die Kurve der Funktion steigt streng monoton. Im vorliegenden Fall ist das Wachstum (hier: Anstieg der Grubenwasser[druck]fläche) nach oben beschränkt und degressiv. Die Wachstumsgeschwindigkeit (hier: Grubenwasseranstiegsgeschwindigkeit) nimmt folglich mit der Zeit kontinuierlich ab.

Die Beispiele der Bergwerke Königsborn (Ruhrgebiet) und Easington (Durham, UK) zeigen, dass die Sättigungsfunktion den tatsächlichen Grubenwasseranstieg sehr gut nachzeichnet (Abbildung 10). Erst mit Erreichen der Basis des (sehr) schwach durchlässigen Deckgebirges weichen die berechneten und gemessenen Kurven des Bergwerks Königsborn deutlicher voneinander ab.

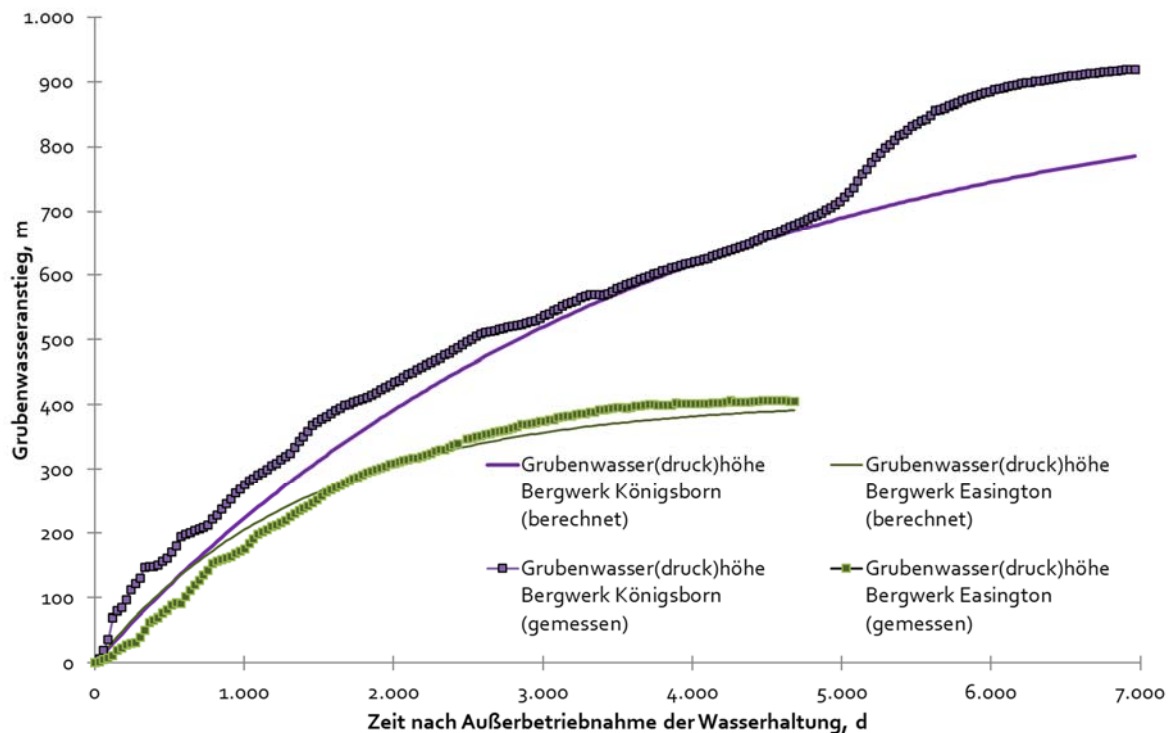


Abbildung 10: Gemessene und mittels der Sättigungsfunktion modellierte Grubenwasseranstiege der Bergwerke Königsborn (Ruhrgebiet) und Easington (Durham [UK]).

4.2 Natürliche Faktoren

4.2.1 Allgemeines

Das Gebirge zeichnet sich durch eine ausgeprägte räumliche Variabilität der natürlichen und anthropogenen Eigenschaften aus (WESTERMANN et al. 2018). Diese Eigenschaften sind oft nur begrenzt bekannt oder aber nur lokal gültig. Beschreibungen der hydrodynamischen Verhältnisse sowie Prognosen zukünftiger Grubenwasseranstiege sind daher stets nur Annäherungen an die tatsächlichen Gegebenheiten (SAMMARCO 1995). Zu den natürlichen Faktoren zählen die Folgenden:

- Hydraulische Gesteins- und Gebirgsdurchlässigkeit (Abschnitt 4.2.2),
- Volumina der Poren und Trennflächen (Abschnitt 4.2.3),
- Wasserzuflussraten (Abschnitt 4.2.4),
- Grundwasserneubildungsrate (Abschnitt 4.2.5),
- Mächtigkeit und lithologische Ausbildung des Deckgebirges (Abschnitt 4.2.6),
- nachbergbauliches Wasserstands-niveau (Abschnitt 4.2.7),
- Grundwasserstände in der Umgebung (Abschnitt 4.2.8),
- Salinität und Temperatur des Grubenwassers.

4.2.2 Hydraulische Gesteins- und Gebirgsdurchlässigkeit

Das Vermögen eines Gesteins, Wasser zu leiten, beschreibt der Durchlässigkeitskoeffizient k_f und der Transmissivitätskoeffizient T_{Gw} (DIN 4049-3 1994). Üblicherweise, wie auch in der DIN 4049-3 (1994) benannt, wird der Begriff „Durchlässigkeitsbeiwert“ und „Transmissivität“ verwendet. Da ein „Beiwert“ entsprechend der Vorgaben der DIN 5485 (1986) jedoch eine Größe der Dimension Eins ist (DIN EN ISO 80000-1 2013), werden im Folgenden die Begriffe „Durchlässigkeitskoeffizient“ und „Transmissivitätskoeffizient“ verwendet.

Der Durchlässigkeitskoeffizient wird stets für ein Gestein angegeben („[hydraulische] Gesteinsdurchlässigkeit“). Dieser besitzt lediglich eine kleinräumige Gültigkeit (HÖLTING & COLDEWEY 2013). Bei dem Transmissivitätskoeffizienten handelt es hingegen um eine integrale Größe der Durchlässigkeitskoeffizienten über mehrere Schichten (Gleichung 16; DIN 4049-3 1994; HÖLTING & COLDEWEY 2013) und wird daher auch als „(hydraulische) Gebirgsdurchlässigkeit“ bezeichnet. Anders als der Durchlässigkeitskoeffizient berücksichtigt der Transmissivitätskoeffizient sämtliche Heterogenitäten des Gebirges.

$$T_{Gw} = \sum_{N=1}^{N_{Sch}} (k_f \times h_{M,Gw})_{N_{Sch}} \quad 16$$

mit

T_{Gw}	=	Transmissivitätskoeffizient (m ² /s),
k_f	=	Durchlässigkeitskoeffizient (m/s),
$h_{M,Gw}$	=	Grundwassermächtigkeit (m),
N_{Sch}	=	Anzahl der Schichten (1).

Gesteine werden anhand des Durchlässigkeitskoeffizienten von sehr schwach ($k_f < 10^{-8}$ m/s; nahezu undurchlässig) bis sehr stark durchlässig charakterisiert ($k_f > 10^{-2}$ m/s; DIN 18130-1 1998; Tabelle 6).

Gesteine werden mit zunehmender Teufe durch Mineralum- und -neubildungen (Zementierung) diagenetisch verfestigt, was eine Verringerung der Porosität und folglich der hydraulischen Durchlässigkeit mit sich führt (JÄGER et al. 1990). Für die hydraulische Durchlässigkeit von Festgesteinen spielen zudem weitere gesteinspezifische Parameter wie Anzahl der Klüfte auf den laufenden Meter (Kluftziffer, „Vernetzungsgrad“), Kluftlänge (cm bis einige 10er m), Kluftöffnungsweite (µm bis mm) und Kluftabstand (cm bis einige 10er m) eine Rolle (BARRENBLATT et al. 1960; KARRENBURG 1981; HÖLTING & COLDEWEY 2013). Das Kluftsystem ist in feinkörnigeren Sedimenten in der Regel dichter und die Kluftöffnungsweiten geringer. Folglich ist der Durchströmungswiderstand höher. Grobkörnigere Sedimente weisen hingegen ein weniger engständiges Kluftsystem. Die Kluftöffnungsweiten sind höher und folglich der Durchströmungswiderstand geringer.

Tabelle 6: Einteilung der Durchlässigkeitskoeffizienten k_f nach DIN 18130-1 (1998).

Einteilung	Durchlässigkeitskoeffizient k_f m/s
sehr stark durchlässig	$> 10^{-2}$
stark durchlässig	$10^{-2} \dots 10^{-4}$
durchlässig	$10^{-4} \dots 10^{-6}$
schwach durchlässig	$10^{-6} \dots 10^{-8}$
sehr schwach durchlässig	$< 10^{-8}$

Auch die tektonische Beanspruchung des Gesteins (Pressung und Zerrung) beeinflusst die hydraulische Durchlässigkeit von Festgesteinen (REUTHER 2018). So gelten Horststrukturen als tektonisch mehr beansprucht als Grabenstrukturen; die Schichten innerhalb von Horststrukturen weisen demnach höhere hydraulische Durchlässigkeiten auf. Auch die Schichten in steiler Lagerung sind intensiver gestört und daher durchlässiger als jene, die söhlig gelagert sind.

Werte für Durchlässigkeitskoeffizienten typischer Gesteine der Rheinisch-Westfälischen Steinkohlenlagerstätte sind u. a. in JÄGER et al. (1990), COLDEWEY et al. (1997), PAAS (1997), BALTES et al. (1998), WENDLAND et al. (2002) und DENNEBORG et al. (2017) zusammengestellt. BALTES et al. (1998) bietet eine Zusammenstellung der Durchlässigkeitskoeffizienten sämtlicher Schichten der Rheinisch-Westfälischen Steinkohlenlagerstätte. Da sich die in JÄGER et al. (1990), COLDEWEY et al. (1997), PAAS (1997) und DENNEBORG et al. (2017) genannten Werte mit jenen in BALTES et al. (1998) decken, werden nachfolgend nur die Werte aus der als Übersichtsquelle zu wertenden Arbeit von BALTES et al. (1998) erläutert. Die in BALTES et al. (1998) genannten Wertespannbreiten für (Gesteins-)Durchlässigkeitskoeffizienten beruhen auf Laboruntersuchungen an Bohrkernen, Kompressions-Durchlässigkeitsversuche (KD-Versuche) sowie in Triaxialzellen (Auszug in Tabelle 7 und Tabelle 9; vollständige Tabelle in Anhang 1). Für die Charakterisierung der hydraulischen Durchlässigkeit der Emscher-Formation werden ergänzend noch die Angaben in WENDLAND et al. (2002) berücksichtigt, da hier eine größere Differenzierung der Emscher-Formation erfolgt.

Anthropogene Aktivitäten (z. B. Bergbau, Tunnelbau) sowie tektonische Vorgänge stören das Gesteinsgefüge und können die hydraulische Durchlässigkeit somit erhöhen. Es ist daher zwischen verritzten (gestörten) und unverritzten (ungestörten) Gesteinen zu unterscheiden. Die hydraulische Durchlässigkeit lithologisch gleicher Gesteine kann sich durch

Abschnitt 4.2 – Natürliche Faktoren

den Einfluss bergbaulicher Aktivität um bis zu einer Zehnerpotenz erhöhen (Tabelle 7; Tabelle 9; BALTES et al. 1998). Die höhere Plastizität infolge des Gebirgsdrucks bewirkt bei feinkörnigen Gesteinen, dass diese eher in ihren ursprünglichen („unverritzten“) Zustand zurückkehren. Die hydraulische Durchlässigkeit verritzter und unverritzter Gesteine gleicher Lithologie unterscheiden sich daher bei feinkörnigen Gesteinen weniger als bei grobkörnigeren Gesteinen (Tabelle 7; Tabelle 9; BALTES et al. 1998).

Tabelle 7: Geohydraulische Kenndaten für ausgewählte Deckgebirgsschichten der Rheinisch-Westfälischen Steinkohlenlagerstätte (verändert nach BALTES et al. 1998; vollständige Tabelle in Anhang 1).

Stratigraphie	Bemerkung	Durchlässigkeits-	speichernutzbare Porosität
		koeffizient	der Klüfte *
		k_f m/s	n_{Peff} %
Tonmergelstein der Emscher- Formation	oberflächen-	1×10^{-6}	0,5 ... 0,8
	nah		
	allgemein	1×10^{-10}	< 0,1
Kalkmergelstein des Turoniums und Cenomaniums	bergbaulich beeinflusst	1×10^{-6}	0,5 ... 1,5
	bergbaulich unbeeinflusst	1×10^{-7}	< 0,5 ... 1

*Schätzwerte (Abschnitt 4.2.3)

Die Durchlässigkeitskoeffizienten für die Emscher-Formation liegen innerhalb der Schwankungsbreite, die in WENDLAND et al. (2002) genannt sind (Tabelle 8):

Tabelle 8: Durchlässigkeitskoeffizienten für die Emscher-Formation (verändert nach WENDLAND et al. 2002).

Stratigraphie	Bemerkung	Durchlässigkeitskoeffizient
		k_f m/s
Emscher-Formation	Verwitterungszone	$4 \times 10^{-11} \dots 1 \times 10^{-9}$
	Auflockerungsbereich	$1 \times 10^{-7} \dots 9 \times 10^{-5}$
	Basis	$1 \times 10^{-11} \dots 7 \times 10^{-10}$

Abschnitt 4.2 – Natürliche Faktoren

Die Bandbreite der lithologischen Beschreibung der Schichten des Oberkarbons reicht von „vorwiegend Sandstein“ bis „vorwiegend Schiefertone“. Je nach Gesteinsanteil wird weiter abgestuft. Dabei gilt, je höher der Anteil an Sandsteinbänke ist, desto höher ist der Durchlässigkeitskoeffizient (Tabelle 9, BALTES et al. 1998; vollständige Tabelle in Anhang 1).

Tabelle 9: Geohydraulische Kenndaten für ausgewählte Schichten des Oberkarbons der Rheinisch-Westfälischen Steinkohlenlagerstätte (verändert nach BALTES et al. [1998]; vollständige Tabelle in Anhang 1).

Lithologie	Bemerkung	Durchlässigkeits-	speichernutzbare
		koeffizient *	Porosität der Klüfte **
		k_f m/s	n_{Peff} %
vorwiegend Schiefertone	bergbaulich	1×10^{-9}	< 1
	beeinflusst		
Schiefertone	bergbaulich	3×10^{-10}	< 0,5
	unbeeinflusst		
Wechselfolge aus Schiefertone und Sandsteinen	bergbaulich	1×10^{-8}	< 2
	beeinflusst		
Sandstein	bergbaulich	3×10^{-9}	< 1
	unbeeinflusst		
vorwiegend Sandstein	bergbaulich	1×10^{-6}	< 3
	beeinflusst		
Sandstein	bergbaulich	1×10^{-7}	< 1
	unbeeinflusst		

*geschätzter, richtungsunabhängiger (durchschnittlicher) Wert („Profilwert“ in BALTES et al. [1998] genannt); Schwankungsbreite nach oben und unten kann um bis zu einer Zehnerpotenz betragen.

**Schätzwerte (Abschnitt 4.2.3)

Diese Daten wurden mittels Laborversuchen an Bohrkernen bestimmt und repräsentieren daher gesteinspezifische Parameter, die somit nur bedingt die in situ gemessene, makroskopische hydraulische Gebirgsdurchlässigkeit repräsentieren (BALTES et al. 1998). Heterogenitäten des Gebirges (z. B. Kluftsystem, Störungen) können durch die Gesteinsproben nicht abgebildet werden. Diese Werte stellen folglich nur eine Annäherung an die tatsäch-

liche hydraulische Gebirgsdurchlässigkeit dar. Nach PAAS (1997) ist die hydraulische Gesteinsdurchlässigkeit beispielsweise von Siltgesteinen des Oberkarbons rd. vier bis fünf Zehnerpotenzen (6×10^{-13} m/s bis $4,6 \times 10^{-15}$ m/s) geringer ist als die hydraulische Gebirgsdurchlässigkeit (3×10^{-9} m/s bis 3×10^{-10} m/s).

4.2.3 Volumina der Poren und Trennflächen

Zur Speicherung des Wassers im Zuge eines Grubenwasseranstiegs stehen neben dem offenen Grubengebäude (Abschnitt 4.3.2) auch die Poren und Trennflächen des Gebirges zur Verfügung. Es wird als geogenes Hohlraumvolumen bezeichnet (Abbildung 11).

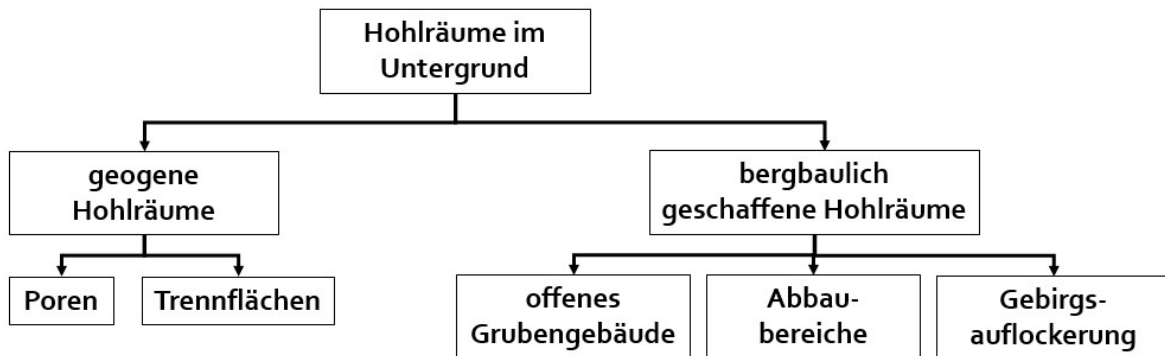


Abbildung 11: Hohlräume im Untergrund.

Die Porosität bestimmt im besonderen Maße die hydraulische Durchlässigkeit eines Gesteins (Abschnitt 4.2.2). Die Porosität feinkörniger Sedimente ist höher als das von grobkörnigeren Sedimenten (Tabelle 10; BLUME et al. 2010). Aufgrund des im Hohlraum vorhandenen und adhäsiv an den Körnern gebundenen Haftwassers und Sicker-, Kapillar- sowie Adsorptionswassers steht allerdings nur ein Teil der Gesamtporosität zur Verfügung, um Wasser aufzunehmen und zu speichern (BLUME et al. 2010). Dieser sogenannte speichernutzbare Hohlraumanteil ist die entscheidende Größe, um die Wasseraufnahmekapazität des Gebirges zu bewerten.

In einem Untertagebergwerk dienen vor allem die Auflockerungsbereiche als speichernutzbare Hohlräume. Weiter von den Strecken entfernt liegende Gebirgsbereiche werden hingegen durch die bergbaulichen Aktivitäten weniger bis nicht gestört (KRATZSCH 2013). Diese Gebirgsbereiche werden daher infolge eines Grubenwasseranstiegs hydraulisch nicht beeinflusst.

Tabelle 10: Größenordnungen für den Gesamtporenanteil n_P und die speichernutzbare Porosität n_{Peff} für Lockergesteine (nach GARLING & DITTRICH 1979).

Art des Lockergesteins	Gesamtporenanteil	speichernutzbare Porosität
	n_P %	n_{Peff} %
sandiger Kies	25 ... 35	20 ... 25
kiesiger Sand	28 ... 35	15 ... 20
Mittelsand	30 ... 38	10 ... 15
schluffiger Sand	33 ... 40	8 ... 12
sandiger Schluff	35 ... 45	5 ... 10
toniger Schluff	40 ... 55	3 ... 8
schluffiger Ton	45 ... 65	2 ... 5

Eine verallgemeinerte Angabe der Werte für gesteinspezifische Hohlraumvolumina von Klüften ist aufgrund unterschiedlicher tektonischer Beanspruchung des Gebirges nicht möglich. Die Porosität in Lockergesteinen kann mittels Laborversuchen ermittelt werden. Kluftvolumina, deren Einflussnahme auf die Wasserbewegung im Untergrund wesentlich größer ist als die des Porenvolumens, sind indes nur schwer zu erfassen. Deren Bestimmung bedarf aufwändige Geländeversuche. BALTES et al. (1998) fasst Schätzwerte für unterschiedliche Gesteine der Rheinisch-Westfälischen Steinkohlenlagerstätte zusammen (Tabelle 7; Tabelle 9). Diese schwanken zwischen 0,1 % und 3 %. Höhere Werte gibt KUNZ (1994), die er anhand von 181 Proben von Gesteinen des Oberkarbons ermittelt hat. So beträgt die Porosität der Schiefertone bis zu 5,2 %, die der Sandschiefer bis zu 6,5 % und die der Sandsteine von bis zu 9,9 %. KARRENBURG & MEINICKE (1962) belegen anhand von nahezu 800 Proben oberkarbonischer Sandsteine eine noch höhere Wertespannbreite (2,2 % bis 12,2 %).

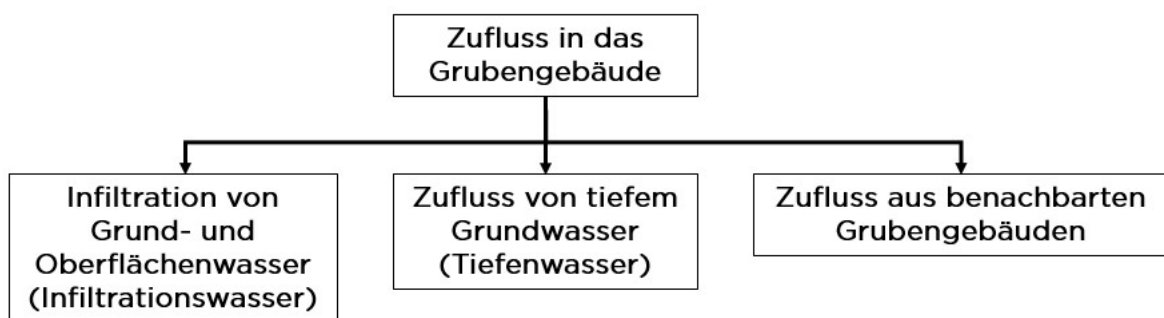
4.2.4 Wasserzuflussraten

Sowohl während der aktiven Gewinnungsphase als auch nach Stilllegung eines Untertagebergwerks fließt Wasser in das Grubengebäude. Mit der Außerbetriebnahme der Wasserhaltung bewirkt der Wasserzufluss, dass das Grubenwasser im Grubengebäude steigt. Die Größenordnung flächenspezifischer Wasserzuflussspenden in ausgewählten aktiven und ehemaligen Steinkohlenrevieren schwankt in Abhängigkeit von der Lagerstättenausbildung stark; die Wertespannbreite reicht von rd. 3 m³/h/km² bis rd. 47 m³/h/km² (Tabelle 11; ECKART et al. 2015).

Tabelle 11: Vergleich ausgewählter flächenspezifischer Zuflussspenden (ECKART et al. 2015).

Revier, Steinkohlenlager- stätte	Zuflussrate \dot{V}_{Zufluss} m ³ /h	Fläche A km ²	Flächenspezifische Zuflussspende \dot{V}_{Spende} m ³ /h/km ²
Ruhrgebiet	11.040	2.670	4,1
Saarland	1.992	438	4,5
Ibbenbüren	2.340	50	46,8
Lothringen	3.900	115	33,9
Oberschlesien	9.120	1.475	6,2
Lugau-Oelsnitz	84	26,3	3,2

Die Gesamtzuflussrate in ein Grubengebäude setzt sich grundsätzlich aus drei Bilanzströmen zusammen: 1.) eine überwiegend vertikale Infiltration von Grund- und Oberflächenwasser (im Folgenden als „Infiltrationswasser“ bezeichnet), 2.) Zuflüsse von tiefem Grundwasser (im Folgenden als „Tiefenwasser“ bezeichnet) und 3.) aus lateral gerichteten Zuflüssen von Grubenwässern aus benachbarten Grubengebäuden (Abbildung 12).

**Abbildung 12: Aufteilung der Zuflüsse in ein Grubengebäude.**

Wasser fließt nur selten punktuell (z. B. über Bohrungen) oder lokal (z. B. entlang von Störungen) in ein Grubengebäude. Häufiger erfolgt der Zufluss flächenhaft von oben. Während der aktiven Gewinnungsphase lässt sich die Zuflussrate, z. B. an Dämmen, direkt messen. Die Zuflussrate kann auch indirekt über die entnommene Grubenwassermenge bestimmt werden. Dazu müssen die von übertage zugeführten Betriebswässer und den über die Wetterführung und Staubindung untertage abgeführten Mengen abgezogen werden. Die Wasserzuflüsse können indes nach Beginn des Grubenwasseranstiegs untertage nicht mehr gemessen werden, da das Grubengebäude in den meisten Fällen nicht

Das Wasser tritt zeitverzögert und reduziert in das Grubengebäude ein, wenn die flözführenden Schichten von einem Deckgebirge überlagert werden. Die Zuflussrate wird einerseits von der Mächtigkeit und der Lithologie des Deckgebirges beeinflusst. Andererseits hängt die Zuflussrate von der Potenzialdifferenz zwischen der Grubenwasser(druck)fläche und den Grundwasserstandsverhältnissen im hangenden Grundwasserleiter ab (Gleichung 17).

Das Grundwasser strömt in Richtung des geringeren Potenzials durch die (sehr) schwach durchlässige Schicht. Die flächenhafte Zuflussrate von Infiltrationswasser lässt sich mit der abgewandelten DARCY-Gleichung (DARCY 1856) berechnen (Gleichung 17; Gleichung 18).

$$\dot{V}_{\text{Inf}} = k_{f,LS} \times A_E \times \frac{\Delta h}{\Delta l_{LS}} \quad 17$$

$$\dot{V}_{\text{Inf}} = k_{f,LS} \times \pi \times l_E^2 \times \frac{\Delta h}{\Delta l_{LS}} \quad 18$$

mit

\dot{V}_{Inf}	=	Infiltrationsrate (m ³ /s),
$k_{f,LS}$	=	Durchlässigkeitskoeffizient der durchströmten (sehr) schwach durchlässigen Leckageschicht (m/s),
A_E	=	Fläche des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs (m ²) (Annahme eines [idealisierten] radial-symmetrischen Absenkungskonus),
l_E	=	Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs eines Untertagebergwerks (m),
Δh	=	Druckhöhenunterschied (m) mit $\Delta h = h_{\text{GW}} - h_{\text{GBW}}$ h_{GW} = Grundwasser(druck)fläche im hangenden Grundwasserleiter (m NHN), h_{GBW} = Grubenwasser(druck)fläche (m NHN),
Δl_{LS}	=	Mächtigkeit der durchströmten (sehr) schwach durchlässigen Leckageschicht (m).

Die Gleichung 17 und Gleichung 18 belegen, dass die Infiltrationsrate in das Grubengebäude proportional

- vom Durchlässigkeitskoeffizienten $k_{f,LS}$ der (sehr) schwach durchlässigen Leckageschicht,
- von der Fläche A_E des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs sowie
- von der Potenzialdifferenz Δh zwischen der Gruben- und Grundwasser(druck)fläche

abhängt. Es gilt daher, dass je höher/größer diese drei Faktoren sind, desto höher ist folglich die Infiltrationsrate. Demgegenüber nimmt die Zuflussrate ab, je mächtiger die (sehr) schwach durchlässige Leckageschicht (Δl_{LS}) ist.

Solange der Grubenwasserstand unterhalb der Basis der (sehr) schwach durchlässigen Leckageschicht liegt, sickert das Wasser frei in das Grubengebäude. Die Zuflussrate ist unabhängig von dem Gradienten $\Delta h/\Delta l_{LS}$ und daher konstant (Gleichung 19).

$$\dot{V}_{\text{Inf}} = k_{f,LS} \times \pi \times l_E^2 = \text{const.} \quad 19$$

mit

\dot{V}_{Inf}	=	Infiltrationsrate, vertikale Zuflussrate aus dem Hangenden (m ³ /s),
$k_{f,LS}$	=	Durchlässigkeitskoeffizient der durchströmten, (sehr) schwach durchlässigen Leckageschicht (m/s),
l_E	=	Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs eines Untertagebergwerks (m).

Erreicht der Grubenwasserstand die Basis der (sehr) schwach durchlässigen Leckageschicht, ist die hangende wasserführende Schicht hydraulisch mit der liegenden Schicht verbunden. Die Zuflussrate hängt nun zusätzlich von der Potentialdifferenz zwischen der Grubenwasser(druck)fläche und der Grundwasser(druck)fläche im hangenden Grundwasserleiter des Deckgebirges ab (Abbildung 13). Mit sukzessiv ansteigender Grubenwasser(druck)fläche nimmt die Zuflussrate linear ab (Gleichung 17).

Der vertikale Zustrom in das Grubengebäude endet, sobald die Grubenwasser(druck)fläche das Niveau der Grundwasser(druck)fläche im Hangenden erreicht. Erst wenn die Grubenwasser(druck)fläche jene des Grundwassers übersteigt, strömt das Grubenwasser in die entgegengesetzte Richtung und somit aus dem Grubengebäude in den hangenden Grundwasserleiter (DENNEBORG et al. 2017).

Die vertikale Zuflussrate (Infiltrationsrate) lässt sich auch aus dem Produkt der flächenspezifischen vertikalen Infiltrationsspende und der Fläche des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs orientierend bestimmen (Gleichung 20). Da beide Faktoren messtechnisch jedoch schwierig zu erheben sind, müssen beide Faktoren rechnerisch abgeschätzt werden (Abschnitt 6.4.3 und Abschnitt 6.4.5).

$$\dot{V}_{\text{Inf}} = \dot{h}_{\text{Inf}} \times \pi \times l_E^2 \quad 20$$

mit

\dot{V}_{Inf}	=	Infiltrationsrate, vertikale Zuflussrate aus dem Hangenden (m ³ /s),
\dot{h}_{Inf}	=	flächenspezifische vertikale Infiltrationsspende (m/d),
l_E	=	Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs eines Untertagebergwerks (m).

Zufluss von tiefem Grundwasser (Tiefenwasser)

In Untertagebergwerken mit einer mächtigen Deckgebirgsüberlagerung kann der Zuflussteil von Tiefenwasser einen nennenswerten Anteil an der Gesamtzuflussrate einnehmen. Die Zuflussrate von Tiefenwasser kann während des Grubenwasseranstiegs messtechnisch nicht erfasst werden. Ergebnisse von Modellrechnungen zeigen, dass diese Zuflüsse durch die Erhöhung des Auflastdrucks durch die Wassersäule zunehmend abgedrückt werden (z. B. Boxmodell in ECKART [2006], Mine Water Filling Model in BANKS [2001]; Abbildung 14).

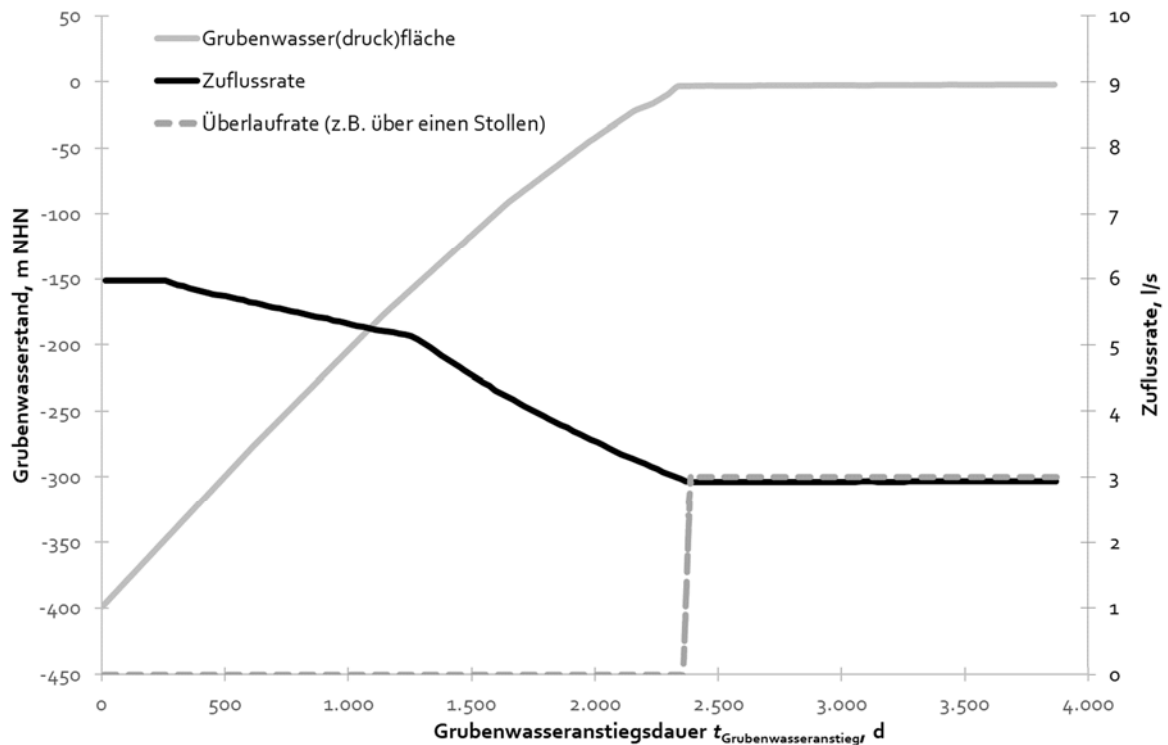


Abbildung 14: Beispiel zur Darstellung der Entwicklung des Grubenwasseranstiegs (graue Kurve), der Zuflussrate (schwarze Kurve) und der Überlauffrate an einer Wasserübertrittsstelle oder Stollen (grau gestrichelte Kurve); modelliert mit dem Mine Water Filling Model (verändert nach BANKS 2001).

Die Zuflussrate wird in Abhängigkeit von der Lage der Grubenwasser(druck)fläche zum Höhenniveau des Zuflusses ermittelt (Gleichung 21). In Sonderfällen ist der Ausbiss einer hydraulisch wirksamen Trennfläche („Speisungsniveau“) relevant, wenn durch diese ein Zufluss erfolgt (Abschnitt 4.1.1). Die Zuflussrate bleibt konstant, solange die Grubenwasser(druck)fläche unterhalb der Höhenlage des Zuflusses z_{Zufluss} liegt ($h_{\text{Gbw}} < z_{\text{Zufluss}}$; BANKS 2001). Der Term $(h_{\text{Gw}} - z_{\text{Zufluss}})$ verändert sich in diesem Fall nicht (Gleichung 21).

$$\dot{V}_{\text{Tw}} = C \times (h_{\text{Gw}} - z_{\text{Zufluss}}) = \text{const} \quad 21$$

mit

- \dot{V}_{Tw} = horizontale Zuflussrate von Tiefenwasser (m^3/d),
- C = hydraulischer Leitwert für die Zuflussrate (m^2/d),
(mit $C = \frac{\dot{V}_{\text{Zufluss},0}}{(h_{\text{Gw},0} - z_{\text{Zufluss}})}$)
- $\dot{V}_{\text{Zufluss},0}$ = Zuflussrate zu Beginn des Grubenwasseranstiegs (m^3/d),
- $h_{\text{Gw},0}$ = Grubenwasser(druck)fläche zu Beginn des Grubenwasseranstiegs (m NHN),
- h_{Gw} = Grundwasser(druck)fläche im Grundwasserleiter, aus dem die Infiltration erfolgt (m NHN),
- z_{Zufluss} = Teufenlage des Zuflusses von Tiefenwasser (m NHN).

Sobald die Grubenwasser(druck)fläche die Teufenlage des Zuflusses übersteigt ($h_{\text{Gbw}} > z_{\text{Zufluss}}$), ändert sich die Zuflussrate. Je näher sich die Grubenwasser(druck)fläche dem Speisungsniveau nähert, desto geringer wird die Zuflussrate (Gleichung 22).

$$\dot{V}_{TW} = C \times (h_{GW} - h_{Gbw,j}) \quad \text{const} \quad 22$$

mit

$$\begin{aligned} \dot{V}_{TW} &= \text{horizontale Zuflussrate von Tiefenwasser (m}^3\text{/d)}, \\ C &= \text{hydraulischer Leitwert für die Zuflussrate (m}^2\text{/d)}, \\ h_{GW} &= \text{Grundwasser(druck)fläche (m NHN),} \\ &\quad \text{(beachte Anmerkung weiter oben)} \\ h_{Gbw,j} &= \text{Grubenwasser(druck)fläche zum Zeitpunkt } t_j \text{ (m NHN).} \end{aligned}$$

Der Zufluss von Tiefenwasser endet, sobald die Grubenwasser(druck)fläche das Speisungsniveau des Zuflusses überstaut (Gleichung 23).

$$h_{GW} = h_{Gbw,j} = 0 \quad 23$$

mit

$$\begin{aligned} h_{GW} &= \text{Grundwasser(druck)fläche (m NHN),} \\ h_{Gbw,j} &= \text{Grubenwasser(druck)fläche zum Zeitpunkt } t_j \text{ (m NHN).} \end{aligned}$$

Die Entwicklung der Zuflussrate von Tiefenwasser hängt demnach direkt von der Höhe der Grubenwasser(druck)fläche ab. Im trivialsten Fall nimmt die Zuflussrate linear ab (Gleichung 21 und Gleichung 22; Abbildung 14). Je nach Lithologie der hangenden Schichten (z. B. Deckgebirge mit erhöhtem Hohlraumvolumen) kann die Entwicklung der Zuflussrate von der linearen Funktion abweichen (ECKART et al. 2018).

Zufluss aus benachbarten Grubengebäuden

Mehrere Untertagebergwerke können durch Strecken hydraulisch miteinander verbunden sein und ein weitverzweigtes Netz darstellen (z. B. Ruhrgebiet, Oberschlesien [ROGOZ & POSY EK 2000]). In solchen Untertagebergwerken existiert neben den vertikal gerichteten Strömungen auch ein Wasserzustrom aus benachbarten Untertagebergwerken. Entscheidend für die laterale Wasserströmung von einem zum anderen Untertagebergwerk ist die Höhe der Übertrittsstelle, die der Grubenwasserstand für den Überlauf erreichen muss. In Untertagebergwerken ohne hydraulisch wirksamen Streckenverbindungen zu benachbarten Untertagebergwerken erfolgt kein lateraler Zu- oder Abstrom über diese. Grund- und Grubenwasser kann allerdings über wasserdurchlässige Schichten im Deckgebirge in ein benachbartes Untertagebergwerk übertreten (Abschnitt 5.4).

4.2.5 Grundwasserneubildung

Die Grundwasserneubildungsrate stellt eine wichtige Einflussgröße im hydrologischen Kreislauf dar. Dieser Begriff beschreibt nach DIN 4049-3 (1994) den „Zugang von infiltriertem Wasser zum Grundwasser“. Die Grundwasserneubildungsrate ändert sich im Verlauf eines Jahres. Vor allem die Niederschläge während des hydrologischen Winterhalbjahres

(November bis April) sind von großer Bedeutung, da der Wasserverbrauch durch die Vegetation sowie durch Verdunstung in dieser Zeit geringer ist als im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober; HÖLTING & COLDEWEY 2013). Folglich ist der Anteil des Niederschlagswassers, das den gesättigten Bereich erreicht und zur Neubildung des Grundwassers beiträgt, im hydrologischen Winterhalbjahr höher. Für die Bestimmung der flächendifferenzierten Grundwasserneubildungsrate steht eine Vielzahl an Ansätzen zur Verfügung, die jeweils an unterschiedliche Anforderungen angepasst sind (MEßER 2013).

Schon früh wurde aufgezeigt, dass die Zuflussraten in das Grubengebäude mit den Niederschlagsraten korrelieren. Bereits SEMMLER (1955) erkannte, dass die Zuflussraten in das Grubengebäude und die Niederschlagsraten miteinander korrelieren, indem er die Entwicklung der mittleren Grubenwasserzuflussraten mit den Niederschlagsraten an benachbarten Messstationen verglich. Für eine Vielzahl an Untertagebergwerken stellte Semmler fest, dass beide Größen auch bei Deckgebirgsmächtigkeiten von bis zu 450 m voneinander abhängen. Erst in Untertagebergwerken mit Deckgebirgsmächtigkeiten von mehr als 800 m konnte ein Einfluss der Niederschlagsrate auf die Grubenwasserzuflüsse nicht mehr eindeutig nachgewiesen werden. Der Anteil an infiltriertem Niederschlagswasser am Gesamtzufluss (Summe aus Oberflächen- und Tiefenwasserzufluss) ist bei diesen Deckgebirgsmächtigkeiten zu gering, um die Gesamtzuflussrate erkennbar zu beeinflussen.

4.2.6 Mächtigkeit und lithologische Ausbildung des Deckgebirges

Kennzeichnend für den Aufbau einer Lagerstätte ist die Mächtigkeit und die Lithologie des Deckgebirges, die sich je nach Ablagerungsbedingungen voneinander unterscheiden. Aus geologischer Sicht umfasst ein Deckgebirge alle Schichten, die oberhalb des Grundgebirges liegen (LUEGER 1962; BURGHARDT et al. 2017). Wird ein Deckgebirge aus lagerstättenkundlicher Sicht betrachtet, so zählen jene Schichten dazu, die wirtschaftlich nutzbare Schichten (z. B. Flöze) überlagern (MURAWSKI & MEYER 2010).

Die Eigenschaften des Deckgebirges nehmen unmittelbar Einfluss auf die vertikale Zuflussrate (Infiltrationsrate). Zwischen der lithologischen Ausbildung des Deckgebirges und der Höhe der Infiltrationsrate sind folgende allgemeingültigen Zusammenhänge zu konstatieren (Gleichung 17; Abschnitt 4.2.4):

- Die Höhe der Zuflussrate ist umgekehrt proportional zur Mächtigkeit des Deckgebirges ($\dot{V}_{\text{Inf}} \sim \frac{1}{h_{\text{M,DG}}}$), d. h., dass je mächtiger das Deckgebirge ist, desto geringer ist die Infiltrationsrate.
- Die Höhe der Infiltrationsrate ist proportional zum Durchlässigkeitskoeffizienten ($\dot{V}_{\text{Inf}} \sim k_f$), d. h., dass je geringer die hydraulische Durchlässigkeit des Deckgebirges ist, desto geringer ist die Infiltrationsrate.

- Solange die Grubenwasser(druck)fläche unterhalb der Basis des Deckgebirges verbleibt, sickert das Wasser frei zu. Die Höhe der (flächenspezifischen) Infiltrationspende entspricht dem Durchlässigkeitskoeffizienten ($\dot{h}_{\text{Inf}} = k_{fi}$; Abschnitt 6.4.3), d. h., dass je geringer die hydraulische Durchlässigkeit des Deckgebirges ist, desto geringer ist die vertikale Zuflussrate (Infiltrationsrate).
- Sobald die Grubenwasser(druck)fläche die Basis des Deckgebirges übersteigt, ändert sich die Infiltrationsrate proportional zur Druckhöhendifferenz zwischen dem Grund- und Grubenwasserstand ($\dot{V}_{\text{Inf}} \sim \Delta h$). Erreicht die Grubenwasser(druck)fläche das Druckniveau des Grundwassers, endet der vertikale Zufluss (Infiltration).

Die Perforation des Deckgebirges, u. a. durch Bohrungen, kann das Gefüge des Deckgebirges stören und zu hydraulisch wirksamen Wasserwegsamkeiten führen, die wiederum die hydraulische Durchlässigkeit und somit die vertikale Zuflussrate (Infiltrationsrate) erhöhen kann. In Deckgebirgen, die aus feinkörnigen Sedimenten (z. B. Tone, Schluffe) bestehen, neigen die Bohrlöcher aufgrund der erhöhten Plastizität der Gesteine zum Selbstverschluss (WESCHE 2017; Abschnitt 4.1.1).

4.2.7 Nachbergbaulicher Wasserstand

Nach der Außerbetriebnahme der Wasserhaltung steigt das Grubenwasser an. Es strebt das ursprüngliche (natürliche) Druckhöhenniveau an, welches vor den bergbaulichen Aktivitäten herrschte. Dieses Niveau wird als „nachbergbaulicher Wasserstand“ bezeichnet. Da die bergbaulichen Aktivitäten die ursprünglichen Verhältnisse nachhaltig gestört haben, ist ein Grubenwasseranstieg bis zu dem ursprünglichen Niveau nicht möglich. Ein Grubenwasseranstieg endet oftmals bereits mit dem Erreichen des tiefsten Entwässerungstollens. Durch Pumpmaßnahmen kann die Grubenwasser(druck)fläche auch tiefer gehalten werden (Abschnitt 4.3.4).

Selten ist das natürliche Wasserstandsniveau vor Beginn der aktiven Gewinnungsphase dokumentiert. Daher sind hilfsweise Analogievergleiche mit benachbarten, bereits gefluteten Schächten zu ziehen (COLDEWEY & MÜLLER 1994). Hinweise, wie hoch das natürliche Wasserstandsniveau liegt, können aber beispielsweise auch Quellen geben. Vor allem am südlichen Rand des Ruhrgebiets sowie am Hellweg wiesen viele Quellen vor Aufnahme der bergbaulichen Aktivitäten eine Schüttung auf (HUYSEN 1855). Durch die Grubenwasserabsenkung im Zuge des industriellen Steinkohlenbergbaus versiegten viele dieser Quellen.

4.2.8 Grundwasserstände in der Umgebung des Grubengebäudes

Wasserhaltungsmaßnahmen beeinflussen die Grund- und Grubenwasserverhältnisse in der Umgebung eines Grubengebäudes (Abschnitt 4.3.4). Der hydraulisch wirksame Einflussbereich hängt wiederum von der Dauer und der räumlichen (vertikalen und lateralen) Ausdehnung der Rohstoffgewinnung ab (Abschnitt 4.3.5). Die umliegenden Grundwasserstände nehmen unmittelbar Einfluss auf die Zuflussraten in das Grubengebäude (Abschnitt 4.2.4). Mit fortschreitendem Grubenwasseranstieg übt die Wassersäule einen zunehmend höheren Gegendruck auf den Wasserzufluss aus dem Hangenden aus. Ebenso nimmt die Ausdehnung des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs ab, innerhalb dessen das Wasser dem Grubengebäude zufließt (Abschnitt 4.3.5). Die Folge ist, dass sich die Infiltrationsrate in das Grubengebäude verringert. Diese Verringerung führt dazu, dass sich das hangende „Wasserreservoir“ langsamer entleert. Dies bewirkt wiederum, dass sich die Grundwasserstände innerhalb des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs weitflächig anheben (siehe z. B. Entwicklung der Grundwasser[druck]fläche im basalen Kluftgrundwasserleiter im Umfeld des Bergwerks Königsborn; dargestellt in KORIEs et al. 2017b). Die Ausdehnung des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs verringert sich folglich durch die Abnahme der Potentialdifferenz zwischen der Gruben- und Grundwasser(druck)fläche. Es besteht somit eine reziproke Beziehung zwischen der Wasserzuflussrate und der Grundwasser(druck)fläche im Umfeld eines Untertagebergwerks.

4.3 Anthropogene Faktoren

4.3.1 Allgemeines

Neben den natürlichen (hydrologischen, hydrogeologischen und geologischen) Faktoren beeinflussen auch die durch menschliche Einwirkung (anthropogenen) geschaffenen Faktoren den Grubenwasseranstieg. Zu den anthropogenen Faktoren zählen die Folgenden:

- Bergbaulich geschaffenes Hohlraumvolumen (Abschnitt 4.3.2),
- hydraulische Durchlässigkeit des Grubengebäudes (Abschnitt 4.3.3),
- gezielte Steuerungsmaßnahmen (Abschnitt 4.3.4),
- hydraulisch wirksamer Einflussbereich der Grubenwasserabsenkung bzw. des Grubenwasseranstiegs (Abschnitt 4.3.5).

4.3.2 Bergbaulich geschaffenes Hohlraumvolumen

Durch das Abteufen von Schächten, das Auffahren von Strecken sowie den Rohstoffabbau entsteht ein weitverzweigtes Netz an unterirdischen Hohlräumen. Diese bergbaulich geschaffenen Hohlräume sind zwischen temporär offenen (Abbaubereiche, Abbaubegleitstrecken) und längerfristigen offenen Hohlräumen (z. B. Schächte, standsicher ausgebaute Strecken) zu unterscheiden (Abbildung 11). Im Zuge eines Grubenwasseranstiegs fließt Wasser in das Grubengebäude, in dem es zirkuliert und gespeichert wird. Die Poren und Klüfte des verritzten Gebirges zwischen den Strecken (Gebirgsauflockerung) sowie (nur mit einem geringeren Anteil) des übrigen (unverritzten) Gebirges füllen sich erst verzögert mit Wasser (bis zu mehreren Jahrzehnten; DENNEBORG et al. 2017). Dieser Sättigungsverlauf beruht auf modelltechnische Berechnungen. Der tatsächliche Sättigungsverlauf des Gebirges ist nicht bekannt.

In deutschen Steinkohlenbergwerken ist der Anteil der abgeworfenen Abbaubereiche (Alter Mann) am Gesamthohlraumvolumen wesentlich höher als der des Strecken- und Schachtvolumens. Bezogen auf das ursprüngliche Abbauvolumen nehmen die Strecken einen Volumenanteil im Mittel von lediglich 2 % bis 3 % ein (ECKART 2019 [persönliche Kommunikation]). Dieses Hohlraumvolumen verringert sich mit der Zeit durch Setzung und Konvergenz. Das dauerhaft verbleibende Hohlraumvolumen wird als bergmännisch geschaffenes Resthohlraumvolumen bezeichnet (im Folgenden als „Resthohlraumvolumen“ bezeichnet). Da sich das Volumen der Abbaubereiche deutlicher als das Volumen der (Gesteins-)Strecken verringert, erhöht sich der Anteil des verbleibenden Streckenvolumens am gesamten Resthohlraumvolumen auf bis zu rd. 10 % (ECKART 2019 [persönliche Kommunikation]). Das Resthohlraumvolumen wird von den folgenden Faktoren beeinflusst (ECKART et al. 2004; KRATZSCH 2013):

- Abbauteufe,
- Lage und Flächengröße des Abbaubereichs,
- Anzahl gebauter und übereinanderliegender Flöze (Durchbauungsgrad),
- Mächtigkeit und Einfallen der Flöze,
- Druck des überlagernden Gebirges,
- Festigkeit des anstehenden Gesteins,
- Art und Menge des Versatzes,
- Art der Gewinnung.

Die exakte Bestimmung des tatsächlich verfügbaren Resthohlraumvolumens in den ehemaligen Abbaubereichen ist nicht möglich. Die Hohlraumvolumina können mittels der in JÄGER et al. (1990) beschriebenen in situ Versuche orientierend abgeschätzt werden, die in

Abschnitt 4.3 – Anthropogene Faktoren

verschiedenen Untertagebergwerken des Ruhrgebiets (z. B. Bergwerke Walsum, Monopol, Consolidation) durchgeführt wurden. Diese Versuche untersuchten die Möglichkeit, feinkörniges Gut als Suspension in den Alten Mann einzubringen. Ist das eingebrachte Suspensionsvolumen und die Geometrie des Alten Manns bekannt, so kann das zur Speicherung verfügbare Hohlraumvolumen orientierend abgeschätzt werden. Es wird eine vollflächige und gleichmäßige Verteilung der Suspension angenommen.

Das Resthohlraumvolumen wird im deutschen Steinkohlenbergbau in der Regel aus der Grundformel der Senkungsberechnung abgeleitet (GOERKE-MALLET 2019 [persönliche Kommunikation]; beschrieben in KRATZSCH 2013). Das Produkt aus der Abbaufäche und der gebauten Mächtigkeit ergibt das Volumen des bergmännisch geschaffenen Hohlraums. Das daraus resultierende Volumen der Senkungsmulde, das sich an der Tagesoberfläche in Form einer Depression ausdrückt, umfasst erfahrungsgemäß ca. 90 % des Gesamtabbauvolumens. Folglich beträgt der Anteil des Hohlraums, der im Untergrund verbleibt, rd. 10 % des Gesamtabbauvolumens.

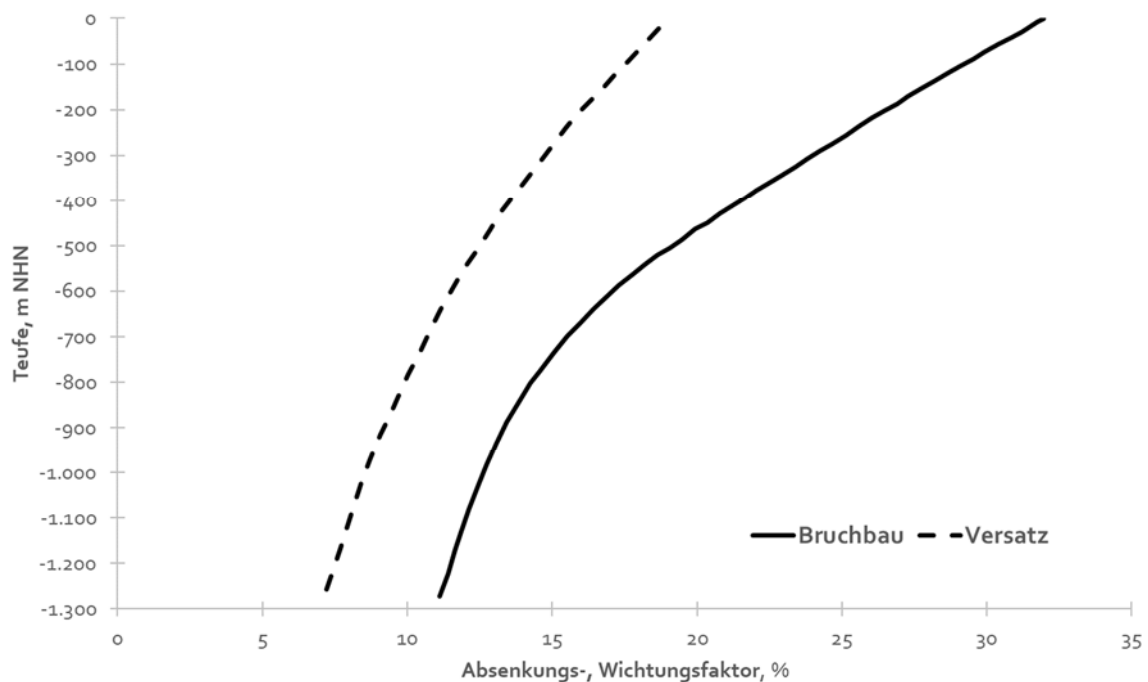


Abbildung 15: Veränderung des Absenkungsfaktors zur Berechnung stark durchbauter Abbaubereiche in Abhängigkeit von der Abbauteufe und der Versatzart (verändert nach ECKART & RÜTERKAMP 2016).

Andere Verfahren nutzen zur Bestimmung des verbleibenden Resthohlraumvolumens einen Absenkungsfaktor (Wichtungsfaktor). Die DMT GmbH & Co. KG (Essen) leitete diesen Faktor für stark durchbaute Abbaubereiche anhand geomechanischer Untersuchungen ab, die im Zusammenhang mit einem (Teil-)Grubenwasseranstieg in der Emschermulde (bis -950 m NHN; Ruhrgebiet) durchgeführt wurden. Das Resthohlraumvolumen wird in

diesem Verfahren in Abhängigkeit von der Abbauteufe und der Versatzart abgeschätzt (Abbildung 15; ECKART & RÜTERKAMP 2016).

Dieses Verfahren baut auf den Erfahrungen hinsichtlich der teufen- und versatzabhängigen Resthohlraumbilanzierung in den ehemaligen französischen und polnischen Steinkohlenrevieren auf (ROGOZ 1978). Die Verfahren sind stets an die jeweiligen Lagerstätten angepasst worden. Für Untertagebergwerke der Rheinisch-Westfälischen Steinkohlenlagerstätte schwankt das Resthohlraumvolumen je nach Abbauteufe zwischen 7 % und 19 % des Rohfördervolumens, wenn Versatz in den Abbaubereich eingebracht wird (schwarz gestrichelte Kurve in Abbildung 15). Im Bruchbau vergrößert sich das Resthohlraumvolumen auf Werte zwischen 11 % und 32 % (schwarze Kurve in Abbildung 15).

Das Resthohlraumvolumen kann auf weitere verschiedene Weisen bestimmt werden. Die Methoden berücksichtigen unterschiedliche Eingangsdaten. Im Folgenden werden weitere ausgewählte und in der Praxis angewandte Methoden beschrieben.

Ermittlung aus dem Anstiegsverlauf und bekannten Zuflussvolumina

Aus dem Grubenwasseranstiegsverlauf, dem dazu gehörigen Zuflussvolumen (bzw. der Zuflussrate) in das Grubengebäude sowie der jeweiligen eingestauten Abbaufäche können die Resthohlraumvolumina überschlägig für einzelne Anstiegsphasen abgeschätzt werden.

Bezogen auf das Gesamtvolumen

$$V_{\text{RHV}} = \dot{V}_{\text{Zufluss}} \times t \quad 24$$

Teufendifferenziert

$$V_{\text{RHV}} = \frac{V_{\text{Zufluss}}}{\Delta h \times A_{\text{Abbau}} \times 10.000} \quad 25$$

$$V_{\text{RHV}} = \frac{\left(\frac{\Delta h}{v_{\text{Anstieg}}} \times 365 \text{d} \times 24 \text{h} \times 60 \text{m} \right) \times \dot{V}_{\text{Zufluss,m}}}{\Delta h \times A_{\text{Abbau}} \times 10.000} \quad 26$$

mit

V_{RHV}	=	bergmännisch geschaffenes Resthohlraumvolumen (%),
V_{Zufluss}	=	Zuflussvolumen (m ³),
Δh	=	Druckhöhenunterschied (m),
v_{Anstieg}	=	Anstiegsgeschwindigkeit (m/a),
A_{Flutung}	=	Fläche des gefluteten Bereichs (m ²),
$\dot{V}_{\text{Zufluss,m}}$	=	mittlere Zuflussrate (m ³ /min).

ROSNER (2011) hat mittels dieser Gleichung die tiefen- und flächenspezifischen Resthohlraumvolumina für verschiedene Bereiche der Aachener und Südlimburger Steinkohlenlagerstätte ermittelt. Diese schwanken zwischen 12 % und 29 % und liegen demnach innerhalb der von ECKART & RÜTERKAMP (2016) ermittelten Wertespannbreite der Resthohlraumvolumina für die Emscher-Mulde (Ruhrgebiet).

Allerdings setzt dieses Verfahren die Kenntnis über die Zuflussmengen und -raten voraus, deren quantitative Erhebung allerdings oftmals unsicher ist. Ebenfalls muss der tatsächliche Grubenwasseranstiegsverlauf bekannt sein, d. h., dass das Resthohlraumvolumen mittels dieser Berechnung erst im Zuge bzw. nach abgeschlossenem Grubenwasseranstieg abgeschätzt werden kann. Für Prognosen sind daher Analogievergleiche zwischen Untertagebergwerken zu stellen, die hinsichtlich ihrer hydrogeologischen und bergbaulichen Eigenschaften vergleichbar sind.

Ermittlung aus der Rohfördermenge

Eine in der Praxis angewandte Methode ist die Ermittlung des Resthohlraumvolumens unter Zugrundelegung der dokumentierten Rohfördermasse oder -volumen. Die Rohförderung umfasst das beim Abbau gewonnene Gesamtvolumen inklusive des Bergeanteils (FELLNER 1999). Angaben zu bergwerksspezifischen Rohfördervolumina („Förderstatistiken“) sind u. a. in HUSKE (2006) vermerkt. Das Resthohlraumvolumen wird gemäß folgender Materialbilanzgleichung ermittelt:

$$V_{\text{RHV}} = V_{\text{RFV}} - V_{\text{Senkung}} - V_{\text{Versatz}} \times (1 - n_{\text{P,Versatz}}) \quad 27$$

mit

V_{RHV}	=	bergmännisch geschaffenes Resthohlraumvolumen (m ³),
V_{RFV}	=	Rohfördervolumen (m ³),
V_{Senkung}	=	Volumen der Geländesenkung (m ³),
V_{Versatz}	=	Volumen des eingebrachten Versatzes (m ³),
$n_{\text{P,Versatz}}$	=	Porosität des Versatzes (1).

Liegen die Massen (in t) anstelle der geförderten Volumina (in m³) vor, so sind die Angaben durch die gesteinspezifischen Dichten mittels der folgenden Gleichung umzurechnen.

$$V_{\text{RFV}} = \frac{m_{\text{RF}}}{\rho_{\text{Gestein}}} \quad 28$$

mit

V_{RFV}	=	Rohfördervolumen (m ³),
m_{RF}	=	Masse der Rohförderung (t),
ρ_{Gestein}	=	Dichte des Gesteins (t/m ³).

Dichten typischer Gesteine des Oberkarbons sind in der Tabelle 12 aufgeführt:

Tabelle 12: Dichten typischer Gesteine des Oberkarbons ([1] SCHUMANN 2016; [2] HOCHLEITNER 2009).

Gesteinsart	Dichte
	ρ_{Gestein} g/cm ³
Sandstein (1)	2,0 ... 2,7
Tonstein (2)	2,4 ... 2,7
Schiefer(ton) (2)	2,7 ... 2,8
Steinkohle (1)	1,3

Liegen wiederum Angaben zur verwertbaren Förderung vor, so muss der Anteil an Berge-material hinzugerechnet werden. Eine Methode zur Bestimmung des Bergeanteils in Ab-hängigkeit von der abgebauten Flözmächtigkeit ist in JUCH (1994) beschrieben.

Diese Methoden sind nur für kleinere, weniger komplex aufgebaute Untertagebergwerke anwendbar bzw. bedürfen eine Einteilung eines Untertagebergwerks in räumlich abgrenz-bare Teilflutungsbereiche, die z. B. durch Wasserdämme oder Übertrittstellen hydraulisch voneinander getrennt sind. In den oben beschriebenen Verfahren bleiben die Poren- und Trennflächenhohlräume (Störungen, Klüfte, Schichtfugen, Schieferungsflächen) des um-liegenden Gebirges unberücksichtigt. Gleichwohl das speichernutzbare Hohlraumvolu-men der Poren und Klüfte gering ist (Abschnitt 4.2.3), bietet es dennoch ein Volumen, um zuströmendes Wasser aufzunehmen. Die nur eingeschränkt mögliche Erfassung der hyd-rogeologischen Bedingungen kann die Prognose der voraussichtlichen Grubenwasseran-stiegsdauer erschweren.

4.3.3 Hydraulische Durchlässigkeit des Grubengebäudes

Im Zuge des Grubenwasseranstiegs fließt das Wasser vornehmlich in den Strecken und Schächten des offenen Grubengebäudes. Je nach Güte des Streckenausbaus, dem Alter des Grubengebäudes und der Art des Nebengesteins neigen die Strecken mit der Zeit auf-grund des Gebirgsdrucks unterschiedlich stark zu konvergieren. Der ursprüngliche Stre-ckenquerschnitt verringert sich (KRATZSCH 2013). Ein vollständiger Streckenverbrauch wird erfahrungsgemäß allerdings nicht angenommen. Es verbleibt stets noch ein Restquer-schnitt mit einer ausreichenden hydraulischen Durchlässigkeit, die eine Wasserüberlei-tung erlaubt (YOUNGER et al. 2002). Die freie Wasserbewegung in Strecken kann nur durch

den Einbau von Wasserdämmen unterbunden werden (Abschnitt 4.3.4). Eine Unterströmung eines Dammes entlang der Auflockerungszonen ist allerdings nicht ausgeschlossen (WOLKERSDORFER 2001). Die hydraulische Durchlässigkeit des Grubengebäudes kann nicht – wie analog zur Einteilung der hydraulischen Durchlässigkeit bei Locker- und Festgesteinen – quantifiziert werden.

Auch die ehemaligen Abbaubereiche (Alter Mann) verdichten sich infolge des überlagernden Gebirgsdrucks zunehmend mit der Zeit (Abschnitt 4.3.2). Im Ruhrgebiet neigen die plastisch wirkenden tonigen Gesteine zur nahezu vollständigen Kompaktion (JÄGER et al. 1990). Diese Bereiche nehmen dann vergleichbare hydraulische Durchlässigkeiten wie das Gebirge an (Abschnitt 4.2.2). In BALTES et al. (1998) werden für den Alten Mann am Beispiel für das Bergwerk Walsum ein Durchlässigkeitskoeffizient von kleiner als 1×10^{-9} m/s angegeben und ist daher als „sehr schwach durchlässig“ charakterisiert. Eine nennenswerte Grundwasserströmung im Alten Mann ist demnach nicht zu erwarten.

Bergbauliche Aktivitäten bewirken neben der Herstellung des offenen Grubengebäudes eine Veränderung der hydraulischen Eigenschaften des Gebirges. Die Bewegung der hangenden Schichten in die geschaffenen Hohlräume lässt neue Trennflächen entstehen und vergrößert den Abstand zwischen bestehenden Trennflächen. Diese Gebirgsauflockerung entsteht vor allem im Umfeld der bergbaulichen Hohlräume. Dieser Bereich weist eine – im Vergleich zu den unverritzten Schichten – erhöhte hydraulische Durchlässigkeit auf (Abschnitt 4.2.2).

4.3.4 Gezielte Steuerungsmaßnahmen des Grubenwasseranstiegs

Ein Grubenwasseranstieg kann hinsichtlich seines räumlichen und zeitlichen Ablaufs aktiv und gezielt gesteuert werden. Dadurch können beispielsweise unkontrollierte Wasseraustritte (MANN & WEDEKIND 2010) oder Beeinträchtigungen von Trinkwasservorkommen verhindert werden (z. B. CORBEL et al. 2017). Dazu werden Pumpen eingesetzt oder Wasserdämme eingebaut.

Eine von alters her bewährte Methode, um den Grubenwasserstand abzusenken, ist die Auffahrung von Entwässerungstollen. Das Grubenwasser steigt bis zu dem Sohlniveau dieses Entwässerungstollens an, der das Grubenwasser dann drucklos abführt. Ein Grubenwasseranstieg wurde nicht nur in den frühen Jahren des Bergbaus über die Auffahrung von Entwässerungstollen nach oben begrenzt. Auch die aktuellen Planungen zur langfristigen Grubenwasserhaltung in den ehemaligen Steinkohlenrevieren an der Saar (hier: zweite Phase; RAG AG 2014) und in Ibbenbüren (RAG ANTHRAZIT IBBENBÜREN GMBH 2020) sehen vor, das Grubenwasser drucklos über Entwässerungstollen abzuleiten.

In vielen aktiven und ehemaligen Steinkohlenrevieren werden Unterwassermotorpumpen in Schächten eingebaut (RAG AG 2014). Deren Einsatz ermöglicht es, die Anstiegs geschwindigkeit der Grubenwasser(druck)fläche nach Bedarf zu regulieren oder gar den Grubenwasseranstieg gänzlich zu stoppen oder rückgängig zu machen.

Der Einbau von Hochdruckwasserdämmen im Grubengebäude dient ebenfalls, den Fließweg des Grubenwassers gezielt zu lenken. Potenzielle Fließwege werden z. B. mittels Wasserdämmen u. a. auf dem Bergwerk Königsborn (Trennung zum Bergwerk Ost; Abschnitt 5.4.3.1; HÜLSMANN et al. 2002) oder im Warndt (Trennung zu den östlich gelegenen Bergwerken im Saarland; RAG AG 2014) hydraulisch von anderen Bergwerksbereichen abgekoppelt.

4.3.5 Hydraulisch wirksamer Einflussbereich

Im Zuge von beispielsweise Tunnelbauarbeiten oder der Entwässerung von Untertagebergwerken wird Wasser entnommen, um den Wasserspiegel in den grundwasserleitenden Schichten bis in eine erforderliche Teufe abzusenken. In homogenen und isotropen Porengrundwasserleitern bildet sich dadurch – in idealisierter Form – ein rotationssymmetrischer Absenkungstrichter aus (HÖLTING & COLDEWEY 2013). Innerhalb dieses hydraulisch wirksamen Einflussbereichs einer Wasserentnahme strömt das Wasser zur Entnahmestelle. Bereiche außerhalb dieses Einflussbereichs werden durch die Wasserentnahme nicht beeinflusst. Je nach den hydrogeologischen Eigenschaften des Untergrunds weicht die Geometrie des Absenkungstrichters unterschiedlich von dieser idealisierten Form ab (ROM 1939). Die Reichweite des Absenkungstrichters kann durch tektonische Strukturen (z. B. schwach durchlässige Störungen) zudem räumlich begrenzt werden.

Mit ansteigender Grubenwasser(druck)fläche nimmt die Ausdehnung des Absenkungstrichters sukzessive ab. Dadurch reduziert sich die Fläche, die hydraulisch aktiviert wird und aus der das Wasser einem Grubengebäude zufließt. Folglich nimmt der Wasserzufluss aus den hangenden Schichten immer weiter ab (Abschnitt 4.2.4).

Die Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs lässt sich orientierend nach folgenden Gleichungen von SICHARDT (1928; Gleichung 29) und KUSSAKIN (1935, Gleichung 30; zitiert in HÖLTING & COLDEWEY 2013) bestimmen. Anhand der Gleichungen wird ersichtlich, dass die Reichweite der Absenkung proportional zum Absenkungsbetrag ist. Ebenfalls beeinflusst der Durchlässigkeitskoeffizient die Absenkungsreichweite. Die empirischen Gleichungen nach SICHARDT (1928) und KUSSAKIN (1935) sind für homogen aufgebaute Lockergesteine anzuwenden. Aufgrund der Heterogenität in Festgesteinen (z. B. geologische Schichtwechsel, tektonische Elemente) sind die ermittelten Absenkungsreichweiten daher nur bedingt anwendbar.

$$l_E = 3.000 \times h_s \times \sqrt{k_f} \quad 29$$

$$l_E = 575 \times h_s \times \sqrt{k_f \times h_{M,GW}} \quad 30$$

mit

l_E	=	Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs (Absenkungstrichter) (m),
h_s	=	Höhe der Absenkung (m),
k_f	=	Durchlässigkeitskoeffizient (m/s),
$h_{M,GW}$	=	Grundwassermächtigkeit (m).

In der sowjetischen Literatur sind Verfahren zur Berechnung der Absenkungsreichweite formuliert, die an bergmännische Grubenwasserhaltungen in Untertagebergwerken angepasst sind (Gleichung 31 bis Gleichung 36, KERKIS 1955; zitiert in MAKSIMOV et al. 1967; PLOTNIKOV & ROGINETS 1989). Die Gleichung 31 dient der überschlägigen Ermittlung der Absenkungsreichweite in nicht weiter differenzierten Rohstofflagerstätten.

$$l_E = 20 \times \sqrt{h_{M,GW} \times k_f \times h_s} \quad 31$$

mit

l_E	=	Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs (m),
$h_{M,GW}$	=	Grundwassermächtigkeit (m),
k_f	=	Durchlässigkeitskoeffizient (m/d),
h_s	=	Höhe der Absenkung (m).

Um die Absenkungsreichweite von Wasserentnahmen aus Bohrlöchern in Festgesteinen abzuschätzen, wird die Gleichung 32 empfohlen (KERKIS 1955). Es werden jeweils eine konstante Entnahmerate und eine flächenspezifische vertikale Infiltrationsspende angenommen.

$$l_E = 0,34 \times \sqrt{\frac{\dot{V}_{\text{Entnahme}}}{\dot{h}_{\text{Inf}}}} \quad 32$$

mit

l_E	=	Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs (m),
$\dot{V}_{\text{Entnahme}}$	=	Entnahmerate (m³/d),
\dot{h}_{Inf}	=	flächenspezifische vertikale Infiltrationsspende (m/d).

Während die Absenkungsreichweite mittels der Gleichung 29 bis Gleichung 32 direkt bestimmt werden können („direkte Verfahren“; Tabelle 13), sind die Absenkungsreichweiten mittels der Gleichung 34 und Gleichung 36 iterativ zu lösen („iterative Verfahren“; Tabelle 14). Auch bei diesen Gleichungen wird angenommen, dass sich die flächenspezifische vertikale Infiltrationsspende nicht mit der Zeit ändert.

Bei $l_E \gg l_0$:

$$l_E \times \sqrt{\lg l_{E,j} - \lg l_0} = 0,4 \times \sqrt{\frac{k_f}{\dot{h}_{\text{Inf}}} \times h_S \times (2 \times \Delta h - h_S)} \quad 33$$

$$l_{E,j+1} = 0,4 \times \sqrt{\frac{k_f}{\dot{h}_{\text{Inf}}} \times h_S \times \frac{(2 \times \Delta h - h_S)}{\lg l_{E,j} - \lg l_0}} \quad 34$$

Für beliebige l_E :

$$l_{E,j} \times \sqrt{\lg l_{E,j} - \lg l_0 - 0,217} = 0,66 \times \sqrt{\frac{k_f}{\dot{h}_{\text{Inf}}} \times h_S \times (2 \times \Delta h - h_S) - 0,5 \times l_0^2} \quad 35$$

$$l_{E,j+1} = 0,66 \times \sqrt{\frac{k_f}{\dot{h}_{\text{Inf}}} \times h_S \times \frac{(2 \times \Delta h - h_S) - 0,5 \times l_0^2}{\lg l_{E,j} - \lg l_0 - 0,217}} \quad 36$$

mit

- l_E = Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs (m),
- $l_{E,j}$ = Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs nach j -Iterationen (m),
- $l_{E,j+1}$ = Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs nach $j+1$ -Iterationen (m),
- l_0 = Schachtradius (m),
- k_f = Durchlässigkeitskoeffizient (m/d),
- \dot{h}_{Inf} = flächenspezifische vertikale Infiltrationsspende (m/d),
- h_S = Höhe der Absenkung (m),
- Δh = Druckhöhenunterschied (mit $\Delta h = h_{\text{Gw}} - h_{\text{Gbw}}$; m).

Tabelle 13: Vergleich der ermittelten Absenkungsreichweiten unter Zugrundelegung direkter Verfahren.

Direktes Verfahren nach	Absen- kungs- betrag	Durchlässigkeits- koeffizient		Druck- höhen- unterschied	Entnahme- rate	Infiltrati- ons- spende	Absen- kungs- reichweite
	h_s	k_f	k_f	Δh	$\dot{V}_{\text{Entnahme}}$	\dot{h}_{Inf}	l_E
	[m]	[m/s]	[m/d]	[m]	[m³/d]	[m/d]	[m]
SICHARDT (1928), Gl. 29	900	$1,0 \times 10^{-8}$	$8,6 \times 10^{-4}$			$2,4 \times 10^{-4}$	270
KUSSAKIN (1935), Gl. 30	900	$1,0 \times 10^{-8}$	$8,6 \times 10^{-4}$	1.000			1.636
KERKIS (1955), Gl. 31	900	$1,0 \times 10^{-8}$	$8,6 \times 10^{-4}$	1.000			558
KERKIS (1955), Gl. 32					4.600	$2,4 \times 10^{-4}$	1.489

Tabelle 14: Vergleich der ermittelten Absenkungsreichweiten unter Zugrundelegung iterativer Verfahren.

Parameter	Formelzeichen	Einheit	KERKIS (1955), Gl. 34	KERKIS (1955), Gl. 36
Absenkungsbetrag	h_s	m	900	900
Durchlässigkeits- koeffizient	k_f	m/s m/d	$1,0 \times 10^{-8}$ $8,6 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-8}$ $8,6 \times 10^{-4}$
Druckhöhen- unterschied	Δh	m	1.000	1.000
Infiltrationsrate	\dot{h}_{Inf}	m ³ /d	$2,4 \times 10^{-4}$	$2,4 \times 10^{-4}$
mittlere Ausdehnung des Grubengebäude	l_o	m	50	50
Annahme für Reichweite	l_{E0}	m	500	500
1. Iteration	l_{E1}	m	755	1.591
2. Iteration	l_{E2}	m	695	969
3. Iteration	l_{E3}	m	706	1.164
4. Iteration	l_{E4}	m	704	1.083

Alle Ansätze liefern aufgrund der Vielzahl an Heterogenitäten im Untergrund nur grobe Annäherungen an die tatsächlichen Absenkungsreichweiten. Dieser Umstand wird auch verdeutlicht, wenn die Ergebnisse der aufgeführten Gleichungen verglichen werden. Die ermittelte maximale Absenkungsreichweite (1.636 m nach Kussakin 1935; Gleichung 30) ist um den Faktor 6 höher als die minimale Absenkungsreichweite (270 m nach SICHARDT 1928; Gleichung 29; Tabelle 13). Werden nur die an die bergmännische Wasserhaltung angepassten Gleichung 31 bis Gleichung 36 berücksichtigt, so verringert sich die Wertespannbreite (558 m bis 1.489 m; Tabelle 13; Tabelle 14).

5 Beschreibung der Untersuchungsgebiete

5.1 Untersuchungsgebiete

Die Grubenwasseranstiege in den Bergwerken Westfalen, Königsborn und im Abbaubereich „Westfeld“ des Bergwerks Ibbenbüren werden hinsichtlich der systembestimmenden Faktoren, die den Grubenwasseranstiegsverlauf und die Zuflussrate beeinflussen, analysiert. Diese Steinkohlenbergwerke wurden bereits vor längerer Zeit stillgelegt und die Wasserhaltung außer Betrieb genommen. Der Grubenwasseranstieg ist in diesen Untertagebergwerken daher bereits weit vorangeschritten und wird messtechnisch erfasst und dokumentiert. Die Bergwerke Westfalen und Königsborn liegen im Zuständigkeitsbereich der RAG AG (Essen), das Bergwerk Ibbenbüren in dem der Tochtergesellschaft RAG Anthrazit Ibbenbüren GmbH (Ibbenbüren).

5.2 Geologischer und hydrogeologischer Überblick

Die Bergwerke Westfalen und Königsborn liegen innerhalb der Westfälischen Steinkohlenlagerstätte (Nordrhein-Westfalen). Umfangreiche Beschreibungen der geologischen Verhältnisse liefern KUKUK (1938) und HAHNE & SCHMIDT (1982). DROZDZEWSKI et al. (1980) beschreiben ausführlich die Tiefentektonik dieser Steinkohlenlagerstätte.

Das Gebirge gliedert sich grundsätzlich in das hangende Deckgebirge der Oberkreide und das liegende paläozoische, steinkohleführende Grundgebirge („Steinkohlengebirge“). Das Deckgebirge und das Grundgebirge unterscheiden sich hinsichtlich der Gesteinsbeschaffenheit, Tektonik und den hydrogeologischen Eigenschaften. Im Folgenden werden der grundsätzliche lithologische Aufbau und die hydrogeologischen Eigenschaften des zentralen und östlichen Ruhrgebiets auf Grundlage der Ausführungen in KUKUK (1938) beschrieben.

Deckgebirge der Oberkreide

Das Deckgebirge des zentralen und östlichen Ruhrgebiets besteht – abgesehen von einem geringmächtigen Auflager quartärer Schichten (< 20 m) – ausschließlich aus Schichten der Oberkreide. Die jüngste Schicht bildet die monotone Folge von mittelgrauem, schluffigen Tonmergelgestein der Emscher-Formation (Coniac bis höheres Unter-Santon). Die Emscher-Formation (oder sogenannter graue Mergel) erreicht im Norden des Ruhrgebiets Mächtigkeiten von bis zu 500 m. Nach Westen und Süden keilt die Emscher-Formation aus. Bis auf den hangenden Bereich bis in eine Teufe von rd. 50 m u. GOK, der geklüftet ist

und wasserführend sein kann, stellt die Emscher-Formation ein Grundwassernichtleiter mit entsprechend geringen Durchlässigkeitskoeffizienten dar (Abschnitt 4.2.2).

Darunter folgen die Schichten des Turoniums, die Mächtigkeiten von bis zu 180 m erreichen. Die Schichten des Turoniums sind faziell unterschiedlich ausgebildet. Es wechseln sich Kalkmergel-, Kalk- und Tonmergelsteine ab (oder sogenannter weißer Mergel). Die Schichten sind geklüftet und stellen den unteren Kluftgrundwasserleiter dar. Eine flächenhafte hydraulische Verbindung zum quartären Grundwasserleiter ist durch die überlagernde Emscher-Formation nicht gegeben.

Die Basis der Schichten der Oberkreide bilden die hellgrauen und bis zu 100 m mächtigen Kalk- und Kalkmergelsteine des Cenomaniums. Die ältesten, bis zu 20 m mächtigen und noch dem Cenomanium zuzuordnenden Gesteine bilden die glaukonitschen Essener Grünsande. In ungestörten Zustand sind diese Feinsandsteine als Grundwassernichtleiter anzusprechen.

Die Schichten des Turoniums und Cenomaniums werden durch die Niederschläge gespeist, die im nördlichen Ausbissbereich des Münsterländer Kreidebeckens in den Untergrund infiltrieren (MICHEL 1963; STRUCKMEIER 1990). Das infiltrierte Wasser fließt in südliche Richtung. Durch die Sumpfungsmaßnahmen hat sich die Grundwasserfließrichtung in den Schichten des Turoniums und Cenomaniums im Süden des Ruhrgebiets umgekehrt, so dass es hier in nördliche Richtung fließt.

Die Schichten der Oberkreide sind flach gelagert, dessen Oberfläche schwach nach Norden bis Nordwesten abtaucht. Die Mächtigkeit der Deckgebirgsschichten nimmt daher in diese Richtung sukzessive zu. Das Deckgebirge ist nahezu ungestört; lediglich in den Bereichen, in denen der Bergbau nah an die Liegendgrenze des Deckgebirges heranreichte, können die Schichten gestört sein.

Die oben beschriebene Abfolge der Gesteine des Deckgebirges beschränkt sich auf das zentrale und östliche Ruhrgebiet. Im Westen und Nordwesten (Rheinische Steinkohlenlagertätte) sind Schichten des Perms (Zechstein), der Trias (Buntsandstein) und Jura (Lias) lokal abgelagert. Für die vorliegende Arbeit sind diese Schichten nicht relevant und werden daher nicht weiter erläutert.

Paläozoisches Grundgebirge (Steinkohlengebirge)

Das Steinkohlengebirge entstand während des Oberkarbons (299 Mio. bis 323 Mio. Jahre vor heute). Es stellt eine zyklische Wechselfolge aus überwiegend klastischen Gesteinen wie Sand- und Tonsteinen und Konglomeraten dar, in denen über 200 Steinkohlenflöze eingeschaltet sind (DROZDZEWSKI et al. 1995). Eine Diskordanz trennt die Schichten des Oberkarbons von den Schichten des Deckgebirges. Im Süden des Ruhrgebiets – in etwa in

Höhe der Städte Mülheim, Essen, Bochum und Dortmund – treten die Schichten des Oberkarbons an der Geländeoberfläche zu Tage. Die Oberfläche des Grundgebirges taucht – analog zu den Schichten des Deckgebirges – nach Norden bis Nordwesten hin mit 2 Grad bis 3 Grad ab. Am nördlichen Rand des Ruhrgebiets ist die Oberfläche erst in einer Teufe von rd. 1.000 m anzutreffen (DROZDZEWSKI 1995).

Die flözführenden Schichten sind gefaltet und gliedern sich folglich in Sattel- und Muldenstrukturen. Die Faltenachsen verlaufen von Westsüdwest nach Ostnordost. Die Intensität der Faltung nimmt von Südosten in Richtung Nordwesten ab. Das Steinkohlengebirge weist eine Vielzahl an Überschiebungen auf, die parallel zu den Faltenachsen verlaufen. Querstörungen (Abschiebungen) verlaufen von Nordwesten nach Südosten.

Die hydraulische Durchlässigkeit und die Porosität der stark diagenetisch verfestigten Schichten des Oberkarbons sind im natürlichen (unbeeinflussten) Zustand aufgrund der großen Teufe gering (Abschnitt 4.2.2 und Abschnitt 4.2.3). Folglich ist auch die Wasserführung gering. In Abhängigkeit von dem Anteil größerer Korndurchmesser, dem Kluftnetz und der bergbaulichen Beanspruchung können allerdings insbesondere die Sandsteinbänke wasserführend sein (JÄGER et al. 1990).

5.3 Bergwerk Ibbenbüren

5.3.1 Geographie, Geologie und Hydrogeologie

Das Bergwerk Ibbenbüren liegt nördlich der Stadt Ibbenbüren im Tecklenburger Land (Nordrhein-Westfalen, Regierungsbezirk Münster). Es war das nördlichste Steinkohlenbergwerk in der Bundesrepublik Deutschland.

Das Steinkohlenvorkommen tritt als Horststruktur der Karbonschichten („Karbonscholle“) morphologisch aus dem Umland heraus und wird seitlich von Störungen begrenzt (LOTZE et al. 1962; KELLER 1968; BÄSSLER 1970). Die vertikale Verschiebung dieser Scholle in Bezug zum Umland beträgt bis zu 1.000 m am Nordostrand sowie um bis zu 2.000 m am Südwestrand und erfolgte zum Ende der Kreide. Die Karbonscholle wird durch Gesteine des Mesozoikums (Kreide, Jura, Trias) umgeben. Die Schichten des Oberkarbons fallen überwiegend flach mit einem Einfallwinkel von rd. 5 Grad nach Norden bzw. Nordosten ein.

Die Steinkohlenlagerstätte ist durch kein Deckgebirge flächendeckend überlagert, so dass die Schichten des Oberkarbons lokal an der Tagesoberfläche anstehen (LOTZE et al. 1962). Dadurch kann das Niederschlagswasser unverzüglich in das Grubengebäude versickern. Lediglich im zentralen Bereich des Bockradener Grabens sind quartäre Lockersedimente in größerer Mächtigkeit abgelagert.

Ein oberer (quartärer) Grundwasserleiter mit einer nennenswerten Mächtigkeit ist flächenhaft nicht ausgebildet. In den Schichten des Oberkarbons können vor allem die bergbaulich beeinflussten Sandsteinbänke wasserführend sein.

5.3.2 Bergbau und bergmännische Wasserwirtschaft

Das Bergwerk Ibbenbüren gehörte zu den letzten beiden Steinkohlenbergwerken in der Bundesrepublik Deutschland. Nach der Preussag AG Kohle war die RAG Anthrazit Ibbenbüren GmbH der letzte Bergwerksbetreiber.

Das Bergwerk Ibbenbüren besteht aus den drei Abbaubereichen „Westfeld“, „Ostfeld“ und „Beustfeld“ (im Folgenden als „Beustfeld“ bezeichnet; LOTZE et al. 1962). Der westliche Abbaubereich (im Folgenden als „Westfeld“ bezeichnet) wird durch den Bockradener Graben von dem östlichen Abbaubereich (im Folgenden als „Ostfeld“ bezeichnet) getrennt; das Beustfeld befindet sich innerhalb des Bockradener Grabens. Es wurde nahezu ausschließlich Anthrazitkohle abgebaut, die als Kraftwerks- und Hausbrandkohle geeignet ist (GOERKE-MALLET 2000).

Das Westfeld wurde im Jahre 1979 stillgelegt und geflutet (DOMALSKI 1987). Das Grubenwasser stieg daraufhin bis zum Niveau des Dickenberger Stollens (+65 m NHN) an und wird seitdem über selbigen abgeleitet. Die Grubenwasserhebungsrate (Summe aus Infiltrationswasser, Tiefenwasserzufluss und Betriebswasser) während der aktiven Gewinnungsphase betrug im Mittel $14,6 \text{ m}^3/\text{min}$ ($\triangleq 21.024 \text{ m}^3/\text{d}$; Schwankung zwischen $9,5 \text{ m}^3/\text{min}$ und $25,0 \text{ m}^3/\text{min}$; Beobachtungszeitraum: Januar 1970 bis Mai 1979). Nach Abschluss des Grubenwasseranstiegs reduzierte sich die Rate, die am Dickenberger Stollen abfließt, auf durchschnittlich $7,1 \text{ m}^3/\text{min}$ ($\triangleq 10.224 \text{ m}^3/\text{d}$; Schwankung zwischen $2,5 \text{ m}^3/\text{min}$ und $26,1 \text{ m}^3/\text{min}$; Beobachtungszeitraum: Januar 1983 bis Dezember 2017; Abbildung 16; Anhang 6). Im Ostfeld wurde bis zum 17.8.2018 aktiver Bergbau betrieben. Das Bergwerk Ibbenbüren wurde am 21.12.2018 stillgelegt. Derzeitige Planungen sehen vor, das Grubenwasser im Ostfeld ansteigen zu lassen und über eine neu aufzufahrende untertägige Strecke („Grubenwasserkanal“) über das Beustfeld und Westfeld abzuleiten (RAG ANTHRAZIT IBBENBÜREN 2020). Der Dickenberger Stollen soll an die neue Strecke angeschlossen werden.

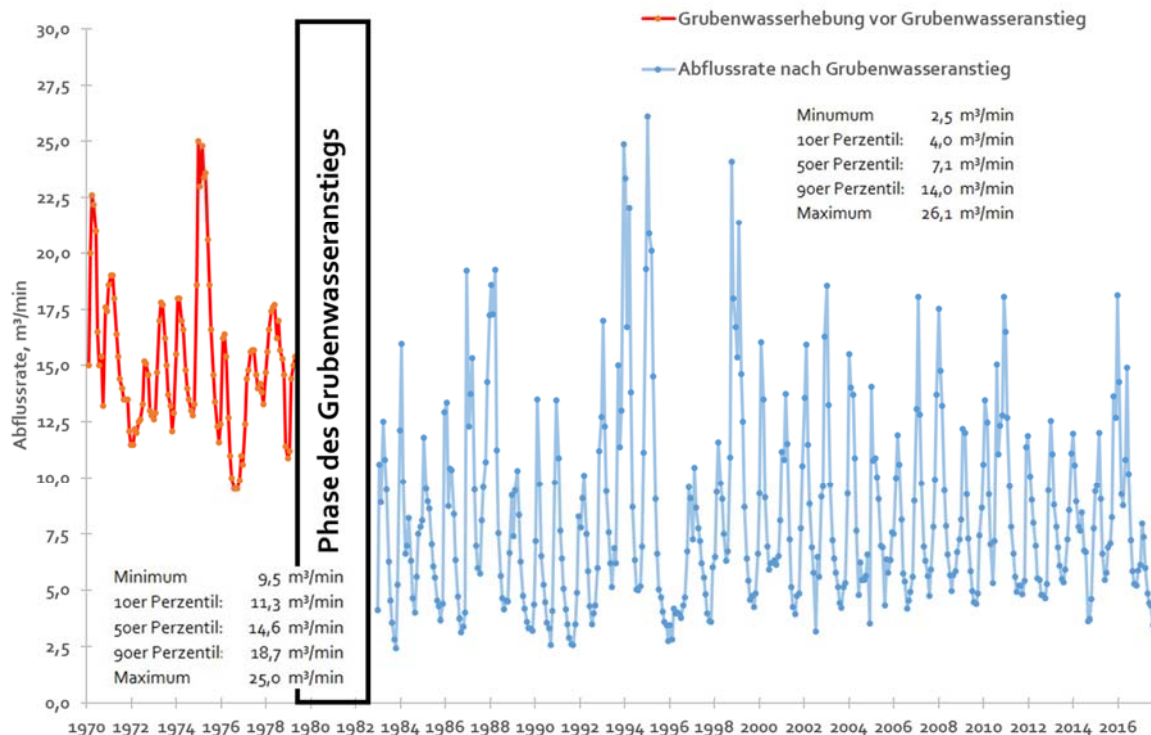


Abbildung 16: Abflussrate des Dickenberger Stollens zur Entwässerung des Abbaubereichs „Westfeld“ des Bergwerks Ibbenbüren für den Zeitraum von 1979 bis 2017 (Daten: DMT GmbH & Co. KG).

Ausführliche Informationen zur bergbaulichen Entwicklung sowie zur bergmännischen Wasserwirtschaft des Bergwerks Ibbenbüren sind in DOMALSKI (1987) und GOERKE-MALLET (2000) zu entnehmen.

5.3.3 Grubenwasseranstiegsverlauf

Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich auf den Grubenwasseranstieg im Westfeld des Bergwerks Ibbenbüren. Zum Zeitpunkt der Fertigstellung der vorliegenden Arbeit war die Wasserhaltung im Ostfeld noch im Betrieb.

5.3.3.1 Planung und Konzept des Grubenwasseranstiegs

Das Bergwerk Ibbenbüren gliedert sich in zwei eigenständige Abbaubereiche. Zwei Hochdruckwasserdämme (Damm 59 auf der Wetterstrecke Flöz Glücksburg [–255,3 m NHN] und Damm 71 auf der 3. Sohle [–171,0 m NHN]), die nach Beendigung des Abbaus im Westfeld in den 1970er-Jahren errichtet wurden, sicherten das damals noch in Betrieb befindene Ostfeld hydraulisch von dem Westfeld ab, in dem das Grubenwasser infolge der Außerbetriebnahme der Wasserhaltung ansteigen sollte (BEIMDIECK 2015). Im Vorfeld der

aktiven Gewinnungsphase im Beustfeld mussten die Dämme 59 und 71 durch neue Hochdruckwasserdämme (Dichtbauwerk I im Schacht Bockraden unterhalb der 3. Sohle und Dichtbauwerk II in der Wetterstrecke Buchholz) in den Jahren 2011 bis 2014 ersetzt werden (BEIMDIECK 2015). Durch die hydraulische Absicherung konnte die Grubenwasser(druck)fläche im Westfeld bis zum Niveau des Dickenberger Stollens (+65 m NHN) ansteigen.

Für die Prognose hinsichtlich der Grubenwasseranstiegsdauer wird ein flutbares Hohlraumvolumen von 2,7 Mio. m³ sowie eine mittlere Zuflussrate von 12 m³/min (= 17.280 m³/d) angenommen (GOERKE-MALLET 2000), so dass die erwartete Dauer etwa 156 Tage betrug. Zu einer vergleichbaren Dauer kam die Abschätzung unter Zugrundelegung der jährlichen Niederschlagsrate (GOERKE-MALLET 2000). Es wird überschlägig angenommen, dass rd. 30 % (= 237 mm/a) der mittleren Jahresniederschlagsrate (789 mm/a) versickert. Bei einer Flächengröße des angenommenen Einwirkungsbereichs von 23,6 km² würde die Grubenwasseranstiegsdauer 176 Tagen betragen.

Die Ergebnisse beider Ansätze unterschritten die tatsächliche Dauer deutlich (> 1.000 Tage; siehe Abschnitt 5.3.3.2). Nach GOERKE-MALLET (2000) können folgende Faktoren für die erheblich längere Grubenwasseranstiegsdauer verantwortlich sein:

- Das flutbare Hohlraumvolumen des Gebirges (Poren und Trennflächen [Klüfte, Störungen, Schichtfugen, Schieferungsflächen]) ist in der Hohlraumabschätzung nicht berücksichtigt, die lediglich das Volumen des noch offenen Grubengebäudes einbezieht. Demnach muss das tatsächliche flutbare Hohlraumvolumen (Summe aus geogen und anthropogen Hohlräumen) größer sein.
- Das flutbare, bergmännisch geschaffene Resthohlraumvolumen ist insbesondere in den oberen Bereichen größer als der angenommene Ansatz von 10 % des ermittelten ursprünglichen bergmännischen Hohlraumvolumens. Dadurch resultiert ein größeres flutbares Resthohlraumvolumen.
- Eine weitere Volumenvergrößerung könnte durch die Hebung der Tagesoberfläche angenommen werden, die durch den mit dem Grubenwasseranstieg einhergehenden Auftrieb verursacht wird.
- Die Versickerungsrate kann infolge einer höheren Interzeptions- und Evapotranspirationsrate geringer sein, was zu einer verringerten Infiltrationsrate in das Grubengebäude führt.

Die mögliche Kombination aus einem größeren flutbaren Hohlraumvolumen und einer geringeren Zuflussrate kann der Grund für die tatsächlich dokumentierte, wesentlich längere Grubenwasseranstiegsdauer sein.

5.3.3.2 Beschreibung des tatsächlichen Grubenwasseranstiegsverlaufs

Im Zuge der Stilllegung des Westfelds wurden die Tagesöffnungen abgedämmt und verfüllt (GOERKE-MALLET 2000). Mit der Außerbetriebnahme der Wasserhaltung am 20.3.1980 stieg das Grubenwasser im Westfeld an (KORIES et al. 2017a). Der freie Grubenwasserspiegel konnte erst nach Einstau des tiefsten Schachtanschlags im Wilhelmschacht gemessen und dokumentiert werden (Abbildung 17); dieser liegt in einer Teufe von –65 m NHN und wurde am 15.1.1981 erreicht (GOERKE-MALLET 2000). Die Messungen der Grubenwasser(druck)fläche unterhalb von –65 m NHN waren demnach nicht möglich, so dass lediglich der Anstiegsverlauf im Teufenbereich zwischen –65 m NHN und +65 m NHN (Überlauf in den Dickenberger Stollen) messtechnisch erfasst werden konnte. Am 28.12.1982 erreichte die Grubenwasser(druck)fläche den Dickenberger Stollen, womit der Grubenwasseranstieg nach rd. 1.000 Tagen beendet war. Der Grubenwasseranstieg im Westfeld zählt zu den schnellsten bekannten Grubenwasseranstiegen in deutschen Steinkohlenbergwerken (Abbildung 2; MELCHERS et al. 2019).

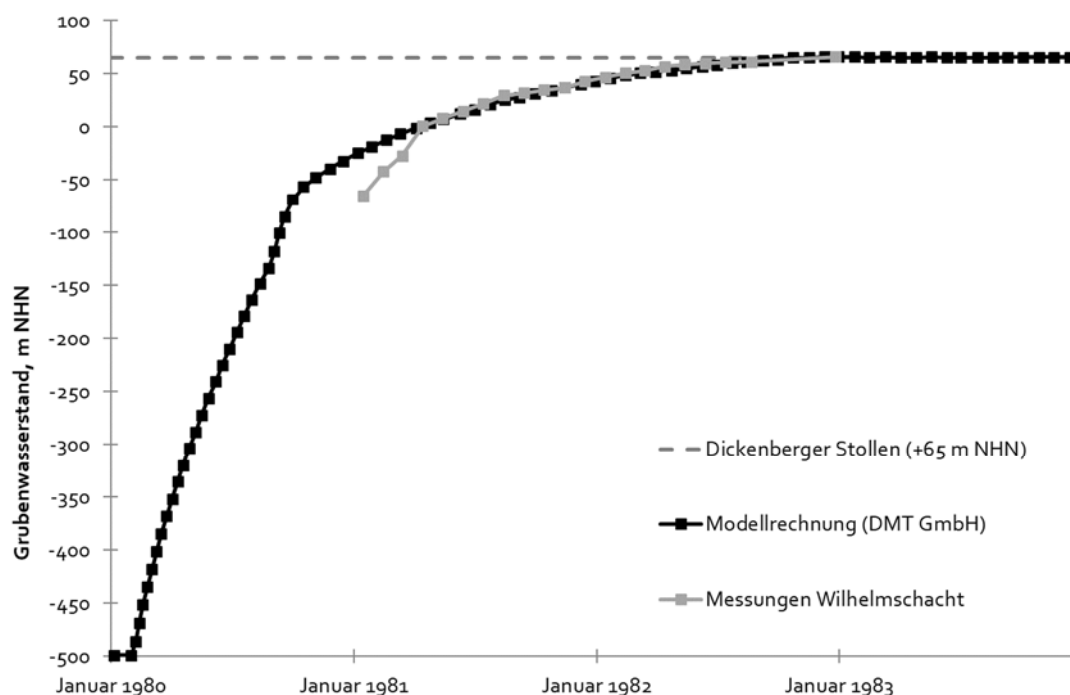


Abbildung 17: Vergleich des Grubenwasseranstiegs im Abbaubereich „Westfeld“ des Bergwerks Ibbenbüren (graue Kurve; gemessen im Wilhelmschacht) mit dem Modellergebnis der DMT GMBH & Co. KG (schwarze Kurve; Boxmodell).

Der Grubenwasseranstieg unterhalb des tiefsten Streckenanschlags im Wilhelmschacht (–65 m NHN) wird in GOERKE-MALLET (2000) prognostiziert sowie von der DMT GmbH &

Co. KG (Essen) mittels des Boxmodells modelliert (siehe in KORIES et al. 2017a; Abbildung 17). Die Grubenwasser(druck)fläche zu Beginn des Grubenwasseranstiegs lag unterhalb der tiefsten Abbausohle im Westfeld (–505 m NHN).

5.3.3.3 Grubenwasseranstiegsrelevante Kenndaten

Dem Grubenwasseranstieg im Westfeld liegen die in der Tabelle 15 zusammengestellten Kenndaten zugrunde. Die Quellen sind unterhalb der Tabelle genannt.

Tabelle 15: Kenndaten des Grubenwasseranstiegs im Bergwerk Ibbenbüren (Abbaubereich „Westfeld“).

	Einheit	Angabe, Wert
1 Zeitraum		März 1980 bis Dez. 1982
2 Dauer	d	1.013
3 Grubenwasser(druck)fläche zu Beginn	m NHN	–505
4 aktuelle Grubenwasser(druck)fläche	m NHN	+65
5 dokumentierte (mittlere) initiale Zuflussrate	m ³ /d	21.024
6 Resthohlraumvolumen	m ³	5.536.742

Bemerkungen: zu 1 bis 4: siehe Abbildung 17. Zu 5: siehe Abbildung 16 und Abschnitt 5.3.2. Zu 6: aus KORIES et al. (2017a).

Die Zuflussrate in das Grubengebäude wird aufgrund des Fehlens eines Deckgebirges vor allem durch den Zufluss aus dem Hangenden bestimmt (rd. 15.800 m³/d; siehe Berechnung auf der nächsten Seite). Der Anteil des horizontalen Zuflusses von Tiefenwasser spielt mit 1/3 (rd. 6.300 m³/d) der Gesamtzuflussrate eine untergeordnete Rolle. Die überschlägige rechnerische Bilanzierung ergibt eine Summe (rd. 22.000 m³/d), die in etwa der mittleren Grubenwasserhebungsrate vor dem Grubenwasseranstieg entspricht (21.024 m³/d; Tabelle 15).

Die vertikale, teufenspezifische Verteilung der bergbaulich geschaffenen Resthohlraumvolumina (Anhang 4) sowie der Durchlässigkeitskoeffizienten auf Basis der in der Literatur recherchierten Wertespannbreite (Anhang 5) sind im Anhang sowohl tabellarisch als auch grafisch dargestellt. Die modellrelevante Einteilung von Schichten gliedert sich lediglich in gestörte und ungestörte Bereiche der Karbonschichten. Für das analytische Modell wird

angenommen, dass sich die bergbaulich bedingte Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit jeweils 10 m ins Hangende und Liegende der Strecken erstreckt.

Vertikale Zuflussrate (Infiltrationsrate) aus dem Hangenden

$$\dot{V}_{\text{Inf}} = \left(6,4 \times 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{d}}\right) \times \pi \times (2.800 \text{ m})^2 = 15.763 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \quad (20)$$

Horizontale Zuflussrate von Tiefenwasser

$$\dot{V}_{\text{Zufluss, Tw}} = \pi \times \left(2,4 \times 10^{-2} \frac{\text{m}}{\text{d}}\right) \times \frac{(570 \text{ m})^2 - (65 \text{ m})^2}{\ln \frac{2.800 \text{ m}}{57 \text{ m}}} = 6.286 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \quad (44)$$

Gesamtzuflussrate

$$\dot{V}_{\text{Inf, ges}} = 15.763 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} + 6.286 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} = 22.049 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

5.4 Bergwerk Königsborn

5.4.1 Geographie, Geologie und Hydrogeologie

Das Bergwerk Königsborn liegt nördlich der Stadt Unna in Nordrhein-Westfalen (Regierungsbezirk Arnsberg) an der Grenze zwischen den Regionen Münsterland und Ruhrgebiet. Aus geologischer Sicht liegt das Bergwerk Königsborn innerhalb der Königsborner Mulde (Abbildung 18; BÄRTLING 1911; ARNOLD 1960; DROZDZEWSKI et al. 1980). Der Steinkohlenabbau begann im Bereich des Kamener Horstes, der im Südwesten durch den Unnaer Sprung und im Nordosten durch den Königsborner Sprung begrenzt wird (HEITFELD et al. 2012). Nach Nordosten schließt sich der Königsborner Graben an, welcher wiederum im Nordosten durch den Fliericher Sprung begrenzt wird (BÄRTLING 1911; ARNOLD 1960; DROZDZEWSKI et al. 1980).

Der geologische Aufbau der Lagerstätte in diesem Bereich entspricht grundsätzlich der im Abschnitt 5.2 beschriebenen Gliederung. Das Deckgebirge an den Schächten schwankt zwischen rd. 180 m (Schacht Königsborn 1) im Südwesten der Berechtsame und rd. 300 m (Schacht Königsborn 4) im Nordosten der Berechtsame (Abbildung 19; Anhang 2). Es taucht mit 2,7 Grad nach Norden ab (RÜTERKAMP & ECKART 2011).

Die grundwasserführenden Schichten des unteren Kluftgrundwasserleiters (Turonium und Cenomanium) zeigen mit 114 m (Schächte Königsborn 2/5) bis 147 m (Schächte Königsborn 3/4) eine geringere Schwankung, die im Mittel 133 m beträgt (Anhang 3).

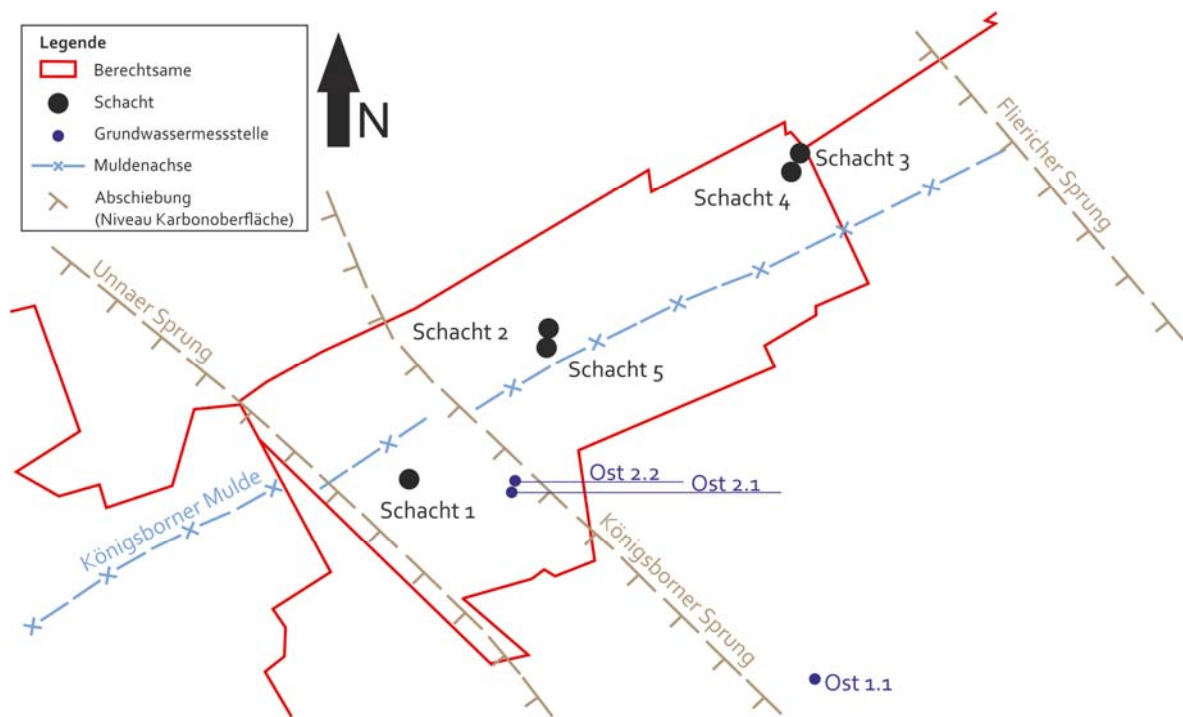


Abbildung 18: Berechtsame, Schachtstandorte und Großtektonik des Bergwerks Königsborn (verändert nach HEITFELD et al. 2012).

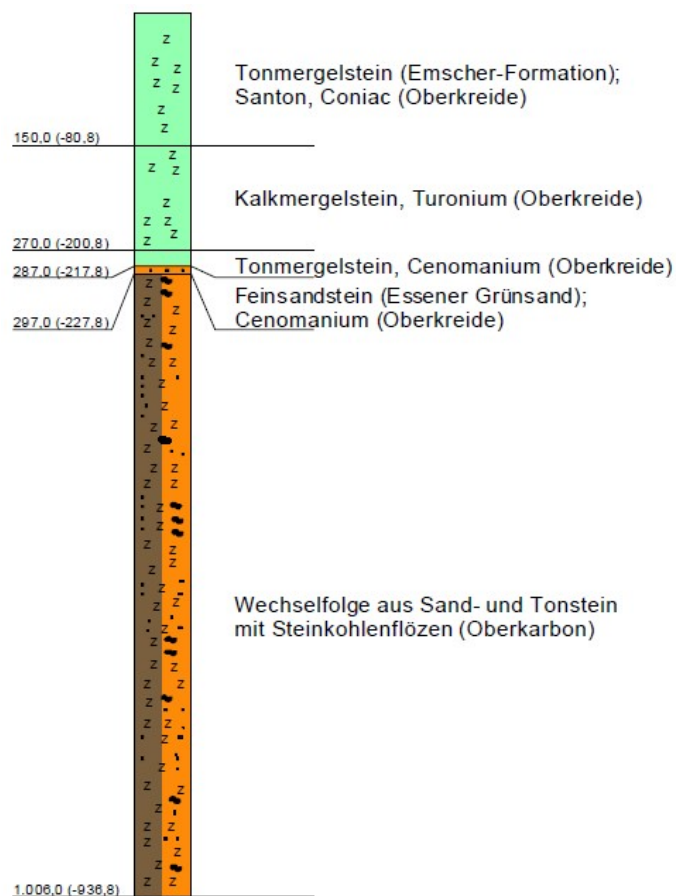


Abbildung 19: Schichtenverzeichnis des Schachts Königsborn 4 (Geländeoberkante bei +69,2 m NHN; nach CLOSTERMANN et al. 1997).

5.4.2 Bergbau und bergmännische Wasserwirtschaft

Der Ursprung des Steinkohlenbergwerks Königsborn war die Saline Königsborn, die bis zum Jahre 1940 betrieben wurde (HUSKE 2006). Der Abbau von Steinkohle begann im Westen der Berechtsame im Bereich des Kamener Horstes mit der Abteufung des Schachts Königsborn 1 in den Jahren 1874 bis 1880. Neben Steinkohle wurde weiterhin auch Siedesalz gewonnen. Bereits Ende des 19. Jahrhunderts wurde der Abbau nach Osten hin in Richtung der Grubenfelder des Bergwerks Bramey ausgeweitet. Ende 1923 kam es schließlich zur Vereinigung mit der Berechtsame Bramey (HUSKE 2006). Im Jahre 1970 wurde das Grubenfeld Monopol III übernommen, in dem ab 1978 im Verbund mit dem Bergwerk Heinrich-Robert nur noch Steinkohle abgebaut wurde.

Das Bergwerk Königsborn wurde nach einer Betriebslaufzeit von rd. 100 Jahren im Mai 1981 stillgelegt. Die Wasserhaltung wurde noch bis September 1996 betrieben. Vor dessen Außerbetriebnahme wurde noch die untertägige Verbindungsstrecke (Monopol-Querschlag; 6. [–890 m-] Sohle) zum nördlich angrenzenden und damals noch aktiven Bergwerk Ost durch einen Hochdruckwasserdamm verschlossen, um Wasserübertritte zu verhindern (COLDEWEY & MÜLLER 1994; HÜLSMANN et al. 2002). Das Bergwerk Königsborn kann daher als ein – über das offene Grubengebäude – nahezu isoliertes Untertagebergwerk betrachtet werden. Allerdings können hydraulische Verbindungen zwischen benachbarten Untertagebergwerken weiterhin über die grundwasserführenden Schichten der Kreide existieren (KORIES et al. 2017b).

Lediglich im Schacht Königsborn 4 besteht noch die Möglichkeit, die Grubenwasser(druck)fläche zu messen. Die anderen Schächte sind verfüllt (HUSKE 2006).

Im Südwesten des Bergwerks Königsborn befinden sich die ehemaligen Bergwerke Mas-sener Tiefbau (Stilllegung 1925), Hörder Kohlenwerk (Stilllegung 1928) und Körne (Stilllegung 1925), die allesamt vor mehr als 90 Jahren stillgelegt und geflutet wurden (DROBNIEWSKI 2017). Der Grubenwasseranstieg ist in diesen Untertagebergwerken nach Kenntnisstand des Verfassers nicht dokumentiert.

5.4.3 Grubenwasseranstiegsverlauf

5.4.3.1 Planung und Konzept des Grubenwasseranstiegs

Zur Verhinderung von Wasserübertritten über das offene Grubengebäude wurde ein Hochdruckwasserdamm in der 6. (–890 m-)Sohle errichtet (Abschnitt 5.4.2). Sonstige Regulierungsmaßnahmen, wie beispielsweise Pumpen, zur Steuerung des Grubenwasseranstiegs werden nicht vorgehalten. Die Grubenwasser(druck)fläche wird lediglich im Schacht Königsborn 4 gemessen (Abbildung 20).

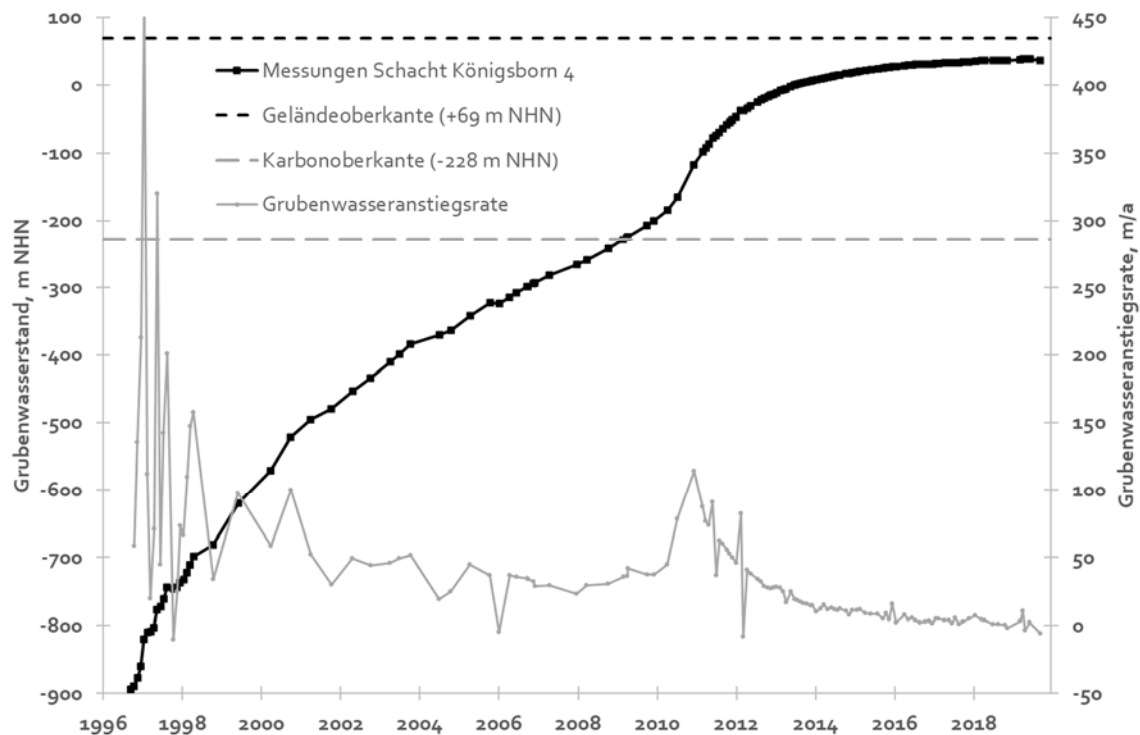


Abbildung 20: Grubenwasseranstieg im Bergwerk Königsborn sowie auf ein Jahr hochgerechnete Grubenwasseranstiegsraten.

COLDEWEY & MÜLLER (1994) schätzen durch Analogieschlüsse mit benachbarten, bereits gefluteten Grubenfeldern die zu erwartende Höhenlage der Grubenwasser(druck)fläche, die sich in etwa nach dem Erreichen des Gleichgewichtszustands einstellt. Demzufolge wird ein endgültiges Niveau zwischen +15 m NHN und +65 m NHN erreicht, welches nur gering unterhalb der Tagesoberfläche (+69,22 m NHN) liegt. Aktuelle Messungen belegen diese Abschätzung (Abbildung 20).

5.4.3.2 Beschreibung des tatsächlichen Grubenwasseranstiegsverlaufes

Der Grubenwasseranstieg im Bergwerk Königsborn setzte unmittelbar nach der Außerbetriebnahme der Wasserhaltung im September 1996 ein (Abbildung 20). Nach einem zunächst schnellen Anstieg und dem Überstau der tiefsten Abbaubereiche mit den größten Wasserzuflüssen (initiale Phase), nahm die Grubenwasseranstiegsgeschwindigkeit mit dem Einstau der Hauptabbausohlen ab. Die Anstiegsgeschwindigkeit stabilisierte sich auf Werte zwischen 30 m/a bis 60 m/a (intermediäre Phase; Abbildung 20). Im Jahr 2010 nahm diese rasch auf zeitweise bis zu 110 m/a zu, was mit dem Einstau des Deckgebirges und dem damit verbundenen geringeren speichernutzbaren Hohlraumvolumen zusammenhängt. Seit 2014 nähert sich der Grubenwasseranstieg dem Gleichgewichtszustand an (fi-

nale Phase). Aktuell wird nur noch ein Anstieg von wenigen Dezimetern pro Jahr gemessen. Die Grubenwasser(druck)fläche liegt aktuell innerhalb des in COLDEWEY & MÜLLER (1994) prognostizierten Bereichs (September 2019: +36 m NHN).

Die initiale geogene Zuflussrate ist entsprechend der unmittelbar vor dem Grubenwasseranstieg dokumentierten Fördermenge auf ca. 3.200 l/min (= 4.608 m³/d) bestimmt (KORIES et al. 2017b). Der aktive Bergbau lag zu diesem Zeitpunkt bereits rd. 15 Jahre zurück.

5.4.3.3 Grubenwasseranstiegsrelevante Kenndaten

Dem Grubenwasseranstieg im Bergwerk Königsborn liegen die in der Tabelle 16 zusammengestellten Kenndaten zugrunde. Die Datenerhebung umfasst den Grubenwasseranstieg bis einschließlich 21.9.2019. Die Quellen sind unterhalb der Tabelle 16 genannt.

Tabelle 16: Kenndaten des Grubenwasseranstiegs im Bergwerk Königsborn.

	Einheit	Angabe, Wert
1 Zeitraum		Sept. 1996 bis b. a. w.
2 Dauer	d	8.406
3 Grubenwasser(druck)fläche zu Beginn	m NHN	-894
4 aktuelle Grubenwasser(druck)fläche	m NHN	+36
5 dokumentierte initiale Zuflussrate	m ³ /d	4.608
6 Resthohlraumvolumen	m ³	10.087.782

Bemerkungen: zu 1 bis 4: siehe Abbildung 20. Zu 5: aus KORIES et al. (2017b). Zu 6: Daten: RAG AG; siehe auch Abschnitt 6.4.4.

Bei der Bilanzierung der Zuflussraten wird berücksichtigt, dass Grundwasser vornehmlich aus südlicher Richtung in das Bergwerk Königsborn strömt, während nach Norden ein Abfluss in das (noch) entwässerte Bergwerk Ost erfolgt (Abschnitt 5.4.2; Abbildung 27). Bedingt durch dieses (halbkreisförmige) Zuflussregime werden die Zuflussraten halbiert (siehe Berechnungen auf der nächsten Seite). Die vertikale (rd. 2.000 m³/d) und horizontale Zuflussraten (rd. 2.500 m³/d) sind in etwa vergleichbar. Die rechnerische Abschätzung belegt, dass die berechnete Gesamtzuflussrate (rd. 4.500 m³/d) jener dokumentierten Zuflussrate (4.608 m³/d) entspricht (Tabelle 16).

Vertikale Zuflussrate (Infiltrationsrate) aus dem Hangenden

$$\dot{V}_{\text{Inf}} = \frac{1}{2} \times \left(1,4 \times 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{d}}\right) \times \pi \times (3.000 \text{ m})^2 = 1.979 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \quad (20)$$

Horizontale Zuflussrate von Tiefenwasser

$$\dot{V}_{\text{Zufluss, Tw}} = \frac{1}{2} \times \pi \times \left(7,2 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{d}}\right) \times \frac{(930 \text{ m})^2 - (80 \text{ m})^2}{\ln \frac{3.000 \text{ m}}{61 \text{ m}}} = 2.483 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \quad (44)$$

Gesamtzuflussrate

$$\dot{V}_{\text{Inf, ges}} = 1.979 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} + 2.483 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} = 4.462 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

Die vertikale Verteilung der Durchlässigkeitskoeffizienten (Abbildung 21; Anhang 5) ist auf Basis des Schichtenverzeichnisses des Schachts Königsborn 4 (Abbildung 19) sowie der in der Literatur recherchierten Wertespannbreite (Abschnitt 4.2.2) erstellt worden. Das Gebirge in Bereich der Strecken weist eine erhöhte hydraulische Durchlässigkeit auf.

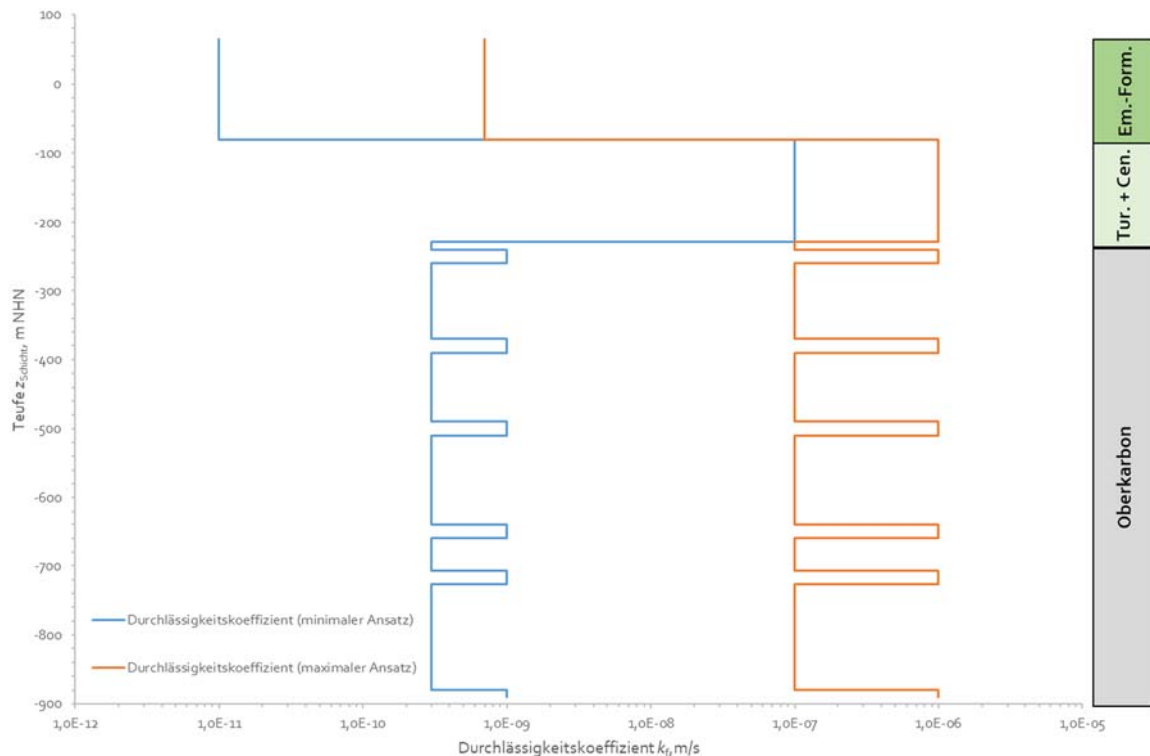


Abbildung 21: Vertikale Verteilung der Durchlässigkeitskoeffizienten (links; minimaler Ansatz: blaue Kurve. Maximaler Ansatz: orange Kurve) auf Basis des Schichtenverzeichnisses (rechts) des Schachts Königsborn 4 (Daten: RAG AG; Tur. + Cen.: Turonium und Cenomanium. Em.-Form.: Emscher-Formation).

Die vertikale Verteilung der bergbaulich geschaffenen Resthohlraumvolumina basiert auf den Daten der RAG AG und ist im Anhang 4 sowohl tabellarisch als auch grafisch aufbereitet.

5.5 Bergwerk Westfalen

5.5.1 Geographie, Geologie und Hydrogeologie

Das Bergwerk Westfalen liegt im Südosten der Stadt Ahlen in Nordrhein-Westfalen (Regierungsbezirk Münster). Geologisch gesehen befinden sich die Grubenfelder innerhalb der Bochumer Mulde im Bereich des Maximiliangrabsens und dem östlich davon gelegenen Ahlener Staffel (Abbildung 22; ARNOLD 1960; ANGRICK 1999). Der Abbaubereich wird im Norden durch die Sutan-Überschiebung (Vertikalversatz von rd. 600 m), im Osten durch den Rosendahl-Sprung (Vertikalversatz von rd. 100 m) und im Westen durch den Bayern-Sprung begrenzt (DROZDZEWSKI et al. 1980).

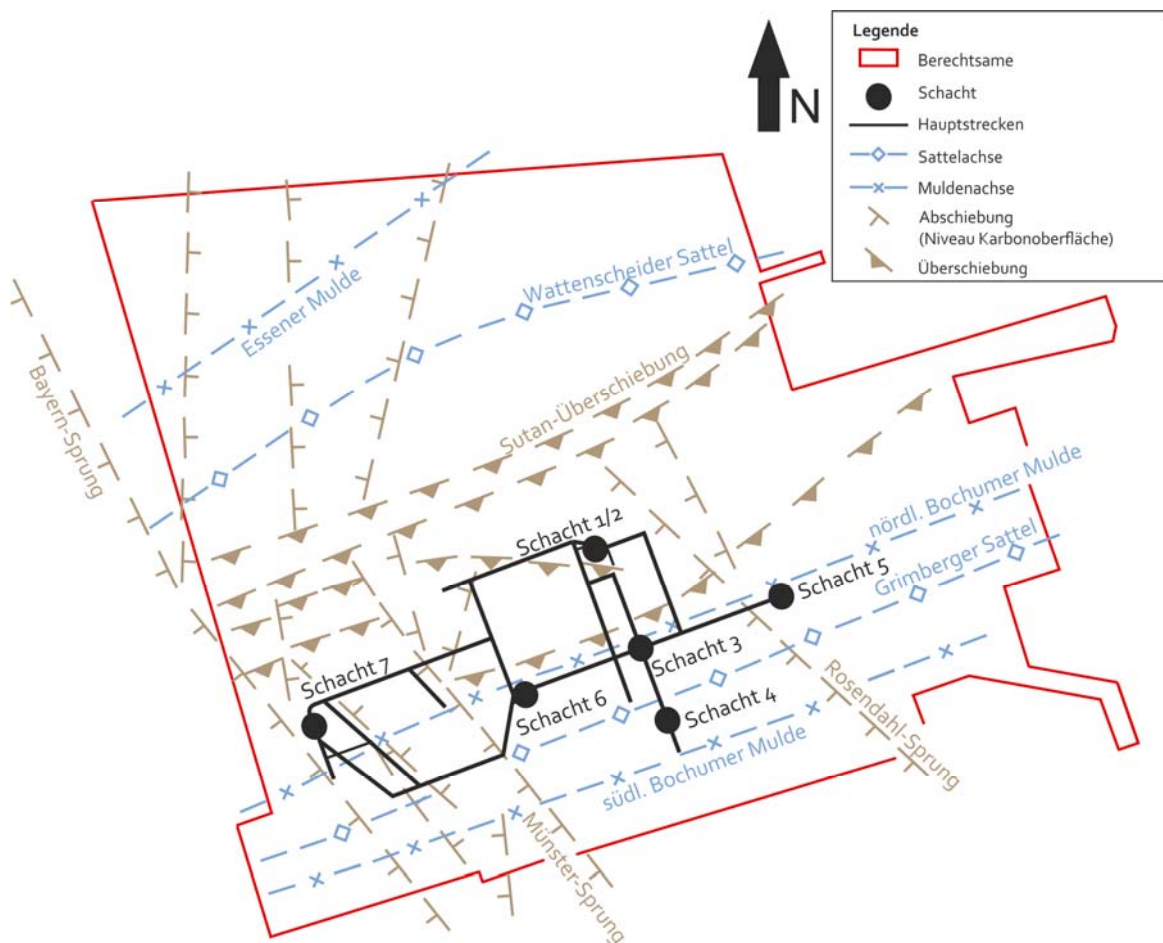


Abbildung 22: Berechtsame, Schachtstandorte und Großtektonik des Bergwerks Westfalen (verändert nach ANGRICK 1999).

Der geologische Aufbau der Lagerstätte in diesem Bereich entspricht grundsätzlich der im Abschnitt 5.2 beschriebenen Gliederung. Im Vergleich zu den beiden zuvor beschriebenen Untertagebergwerken weist das Bergwerk Westfalen das mächtigste Deckgebirge auf,

Abschnitt 5.5 – Überblick: Bergwerk Westfalen

dessen Mächtigkeit zwischen 795 m (Schacht Westfalen 6) und 889 m (Schacht Westfalen 2) schwankt (siehe auch Abbildung 23; Anhang 3). Die Schichten der Oberkreide fallen mit 2 Grad bis 3 Grad nach Norden ein.

Die grundwasserführenden Schichten des Turoniums und Cenomaniums weisen mit 233 m (Schacht Westfalen 6) bis 277 m (Schacht Westfalen 5) eine mehr oder weniger gleichbleibende Mächtigkeit auf, die im Mittel (258 m) in etwa doppelt so hoch ist wie jene des Bergwerks Königsborn (133 m; siehe Abschnitt 5.4.1 und Anhang 3).

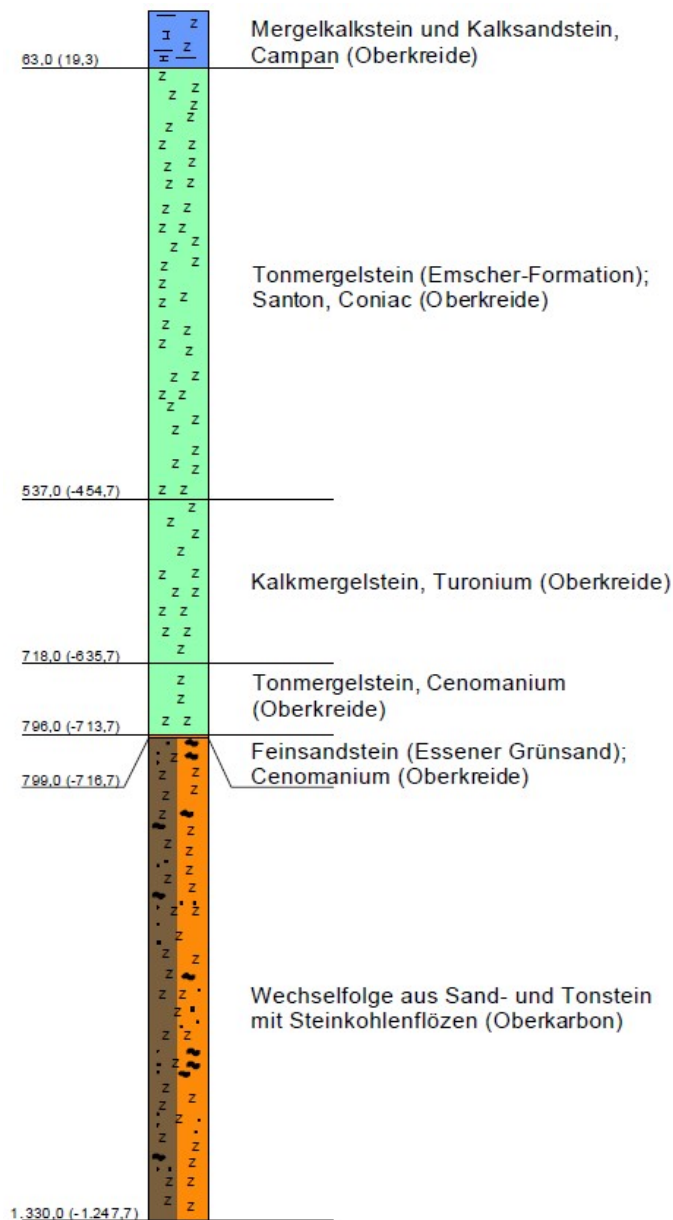


Abbildung 23: Schichtenverzeichnis des Schachts Westfalen 7 (Geländeoberkante bei +82,3 m NHN; nach RÜTERKAMP et al. 2000).

5.5.2 Bergbau und bergmännische Wasserwirtschaft

Das Bergwerk Westfalen ist das am östlichsten gelegene Steinkohlenbergwerk im Ruhrgebiet. Nach mehreren Besitzerwechseln (u. a. durch Eschweiler Bergwerks-Verein AG in 1969) wurde dieses Untertagebergwerk ab 1989 bis zur Stilllegung von der Ruhrkohle AG betrieben (HUSKE 2006). Die ersten Schächte wurden von 1909 bis 1911 abgeteuft; die Eigenbedarfsförderung begann im darauffolgenden Jahr (HUSKE 2006). Das Grubenfeld im Maximiliangraben wurde durch die Abteufung des Schachts Westfalen 7 ab 1976 erschlossen. Die Förderung über Selbigen begann im Jahr 1981 (HUSKE 2006). Der Münster-Sprung (Vertikalversatz von rd. 300 m) trennt dieses Grubenfeld vom östlich gelegenen Altfeld (Abbildung 22). Nördlich der Sutan-Überschiebung fand kein Abbau statt. Das Bergwerk Westfalen wurde am 30.6.2000 stillgelegt. Die Wasserhaltung wurde nur kurze Zeit später außer Betrieb genommen.

Südwestlich schließen sich die ehemaligen und gefluteten Bergwerke Sachsen (Stilllegung 1976) und Maximilian (Stilllegung 1939) an (DROBNIIEWSKI 2017). Untertägige Verbindungen zu den in rd. 2 km Entfernung gelegenen Bergwerken sind nicht dokumentiert (Aussage des Bergwerksbetreibers, genannt in RÜTERKAMP et al. 2000). Da im Norden, Osten und Süden keine Steinkohle abgebaut wurde, zeichnet sich das Bergwerk Westfalen durch eine „Insellage“ ohne hydraulische Verbindungen zu anderen Grubenfeldern aus (RÜTERKAMP et al. 2000).

5.5.3 Grubenwasseranstiegsverlauf

5.5.3.1 Planung und Konzept des Grubenwasseranstiegs

Im Vorfeld des Grubenwasseranstiegs wurden seitens der DMT GmbH & Co. KG Prognosen zur Grubenwasseranstiegsdauer und zu möglichen Auswirkungen auf die Natur erarbeitet. Gemäß RÜTERKAMP et al. (2000) wird die geogene Zuflussrate auf $2,5 \text{ m}^3/\text{min}$ ($= 3.600 \text{ m}^3/\text{d}$) zu Beginn des Grubenwasseranstiegs geschätzt. Dieser Wert basiert auf den mittleren jährlichen Grubenwasserheberaten im Zeitraum von 1921 bis 1999 ($5 \text{ m}^3/\text{min}$) und der Annahme, dass der Anteil des Betriebs-/Fremdwassers an der Gesamtmenge 50 % beträgt. Bei einem flutbaren Hohlraumvolumen im Maximiliangraben von $9,5 \text{ Mio. m}^3$ wird mit einer Grubenwasseranstiegsdauer von mindestens sieben Jahren gerechnet (RÜTERKAMP et al. 2000). Eine Prognose zur Grubenwasseranstiegsdauer für das gesamte Bergwerk Westfalen (inklusive des Altfelds) geben RÜTERKAMP et al. (2000) nicht.

5.5.3.2 Beschreibung des tatsächlichen Grubenwasseranstiegsverlaufes

Seit Beginn des Grubenwasseranstiegs wird die Grubenwasser(druck)fläche im Schacht Westfalen 7 gemessen und dokumentiert. Seit Januar 2020 steht zusätzlich der Schacht Westfalen 2 zur Messung der Grubenwasser(druck)verhältnisse im Altfeld zur Verfügung. Die Grubenwasser(druck)fläche im Schacht Westfalen 2 lag mit -192 m NHN (am 19.2.2020) rd. 6 m tiefer als in dem im Oberstrom gelegenen Schacht Westfalen 7 (-186 m NHN; 23.1.2020).

Der Grubenwasseranstieg setzte unmittelbar nach Stilllegung des Bergwerks (Juni 2000) und der Außerbetriebnahme der Wasserhaltung (September 2000) ein (Abbildung 24). Die initiale Phase (bis einschließlich Januar 2002) wurde messtechnisch nicht dokumentiert. Im Zeitraum von Februar 2002 bis Mitte 2014 stieg das Grubenwasser sehr gleichmäßig mit mittleren Anstiegsgeschwindigkeiten von rd. 20 m/a bis 40 m/a an (intermediäre Phase). Mit Einstau des Deckgebirges stieg das Grubenwasser schneller an; die Anstiegsgeschwindigkeiten nahmen auf im Mittel rd. 100 m/a zu. Die Grubenwasser(druck)fläche lag zum Zeitpunkt der Fertigstellung der Arbeit bei -222 m NHN. Die Annäherung an den Gleichgewichtszustand (finale Phase) erfolgt noch nicht (Abbildung 24).

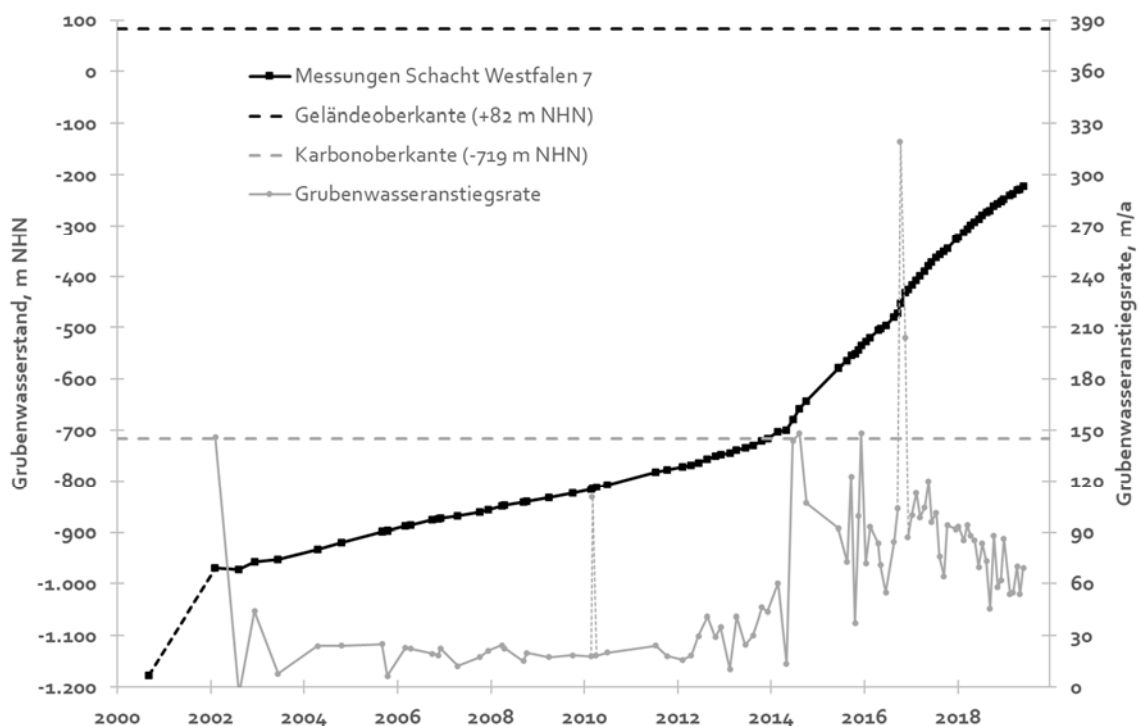


Abbildung 24: Grubenwasseranstieg im Schacht Westfalen 7 sowie auf ein Jahr hochgerechnete Grubenwasseranstiegsraten.

5.5.3.3 Grubenwasseranstiegsrelevante Kenndaten

Dem Grubenwasseranstieg im Bergwerk Westfalen liegen die in der Tabelle 17 zusammengestellten Kenndaten zugrunde. Die Datenerhebung umfasst den Grubenwasseranstieg bis einschließlich 12.6.2019. Die Quellen sind unterhalb der Tabelle genannt.

Tabelle 17: Kenndaten des Grubenwasseranstiegs im Bergwerk Westfalen.

	Einheit	Angabe, Wert
1 Zeitraum		Sept. 2000 bis b. a. w.
2 Dauer	d	6.855
3 Grubenwasser(druck)fläche zu Beginn	m NHN	−1.178
4 aktuelle Grubenwasser(druck)fläche	m NHN	−222
5 dokumentierte initiale Zuflussrate	m ³ /d	3.600
6 Resthohlraumvolumen	m ³	10.191.433

Bemerkungen: zu 1 bis 4: siehe Abbildung 24. Zu 5: aus RÜTERKAMP et al. (2000). Zu 6: Daten: RAG AG; siehe auch Abschnitt 6.4.4.

Die Gesamtzuflussrate in das Grubengebäude wird aufgrund des mächtigen, (sehr) schwach durchlässigen Deckgebirges vor allem durch den horizontalen Zufluss von Tiefenwasser bestimmt (rd. 2.700 m³/d; siehe Berechnung weiter unten). Der Anteil des vertikalen Zuflusses (Infiltration) aus dem Hangenden spielt mit rd. ¼ der Gesamtzuflussrate (rd. 800 m³/d) eine untergeordnete Rolle. Die Summe der bilanzierten Zuflussraten (rd. 3.500 m³/d) entspricht nahezu der dokumentierten initialen Zuflussrate (3.600 m³/d; Tabelle 17).

Vertikale Zuflussrate (Infiltrationsrate) aus dem Hangenden

$$\dot{V}_{\text{Inf}} = \left(8,0 \times 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{d}}\right) \times \pi \times (5.700 \text{ m})^2 = 817 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \quad (20)$$

Horizontale Zuflussrate von Tiefenwasser

$$\dot{V}_{\text{Zufluss, Tw}} = \pi \times \left(4,1 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{d}}\right) \times \frac{(956 \text{ m})^2 - (80 \text{ m})^2}{\ln \frac{5.700 \text{ m}}{81 \text{ m}}} = 2.722 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \quad (44)$$

Gesamtzuflussrate

$$\dot{V}_{\text{Inf, ges}} = 817 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} + 2.722 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} = 3.538 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

Die teufenspezifische Verteilung des bergbaulich geschaffenen Resthohlraumvolumens basiert auf den Aufzeichnungen der RAG AG (Abbildung 25; Anhang 4). Erfahrungsgemäß

Abschnitt 5.5 – Überblick: Bergwerk Westfalen

verbleiben dauerhaft 10 % des ursprünglichen Volumens (Abschnitt 4.3.2). Dieses Volumen kann Wasser im Zuge des Grubenwasseranstiegs aufnehmen. Der minimale und maximale Ansatz grenzt den Vertrauensbereich des Faktors ein, der modelltechnisch untersucht wird (Abschnitt 6.4.4).

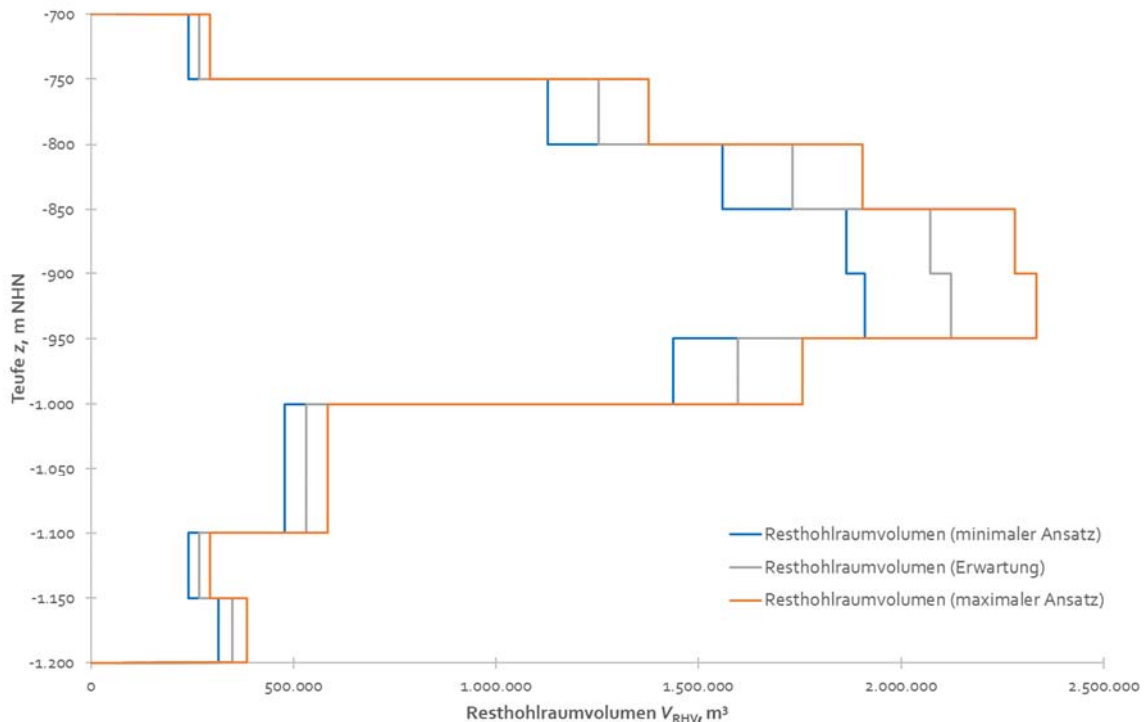


Abbildung 25: Teufenspezifische Verteilung des bergmännisch geschaffenen Resthohlraumvolumens im Bergwerk Westfalen (minimaler Ansatz: Erwartungswert abzüglich 10 %; maximaler Ansatz: Erwartungswert zuzüglich 10 %; Daten: RAG AG).

Die vertikale Verteilung der Durchlässigkeitskoeffizienten auf Basis des Schichtenverzeichnisses des Schachts Westfalen 7 (Abbildung 23) und der in der Literatur recherchierten Wertespannbreite sind im Anhang tabellarisch als auch grafisch dargestellt (Anhang 5).

6 Modellierung des Grubenwasseranstiegs mittels des analytischen Modells

6.1 Begründung und Zielsetzung

Grund- und Grubenwasserströmungen werden in vielen Fällen durch numerische Modellierungen beschrieben. Die Parametrisierung in numerischen Modellen erfordert eine detaillierte Kenntnis über die räumliche Verteilung der natürlichen und anthropogenen Faktoren. Allerdings ist eine solche Detailkenntnis aus verschiedenen Gründen, wie fehlende Daten oder ein unzureichendes Messnetz, oftmals nicht im ausreichenden Maße vorhanden. Eine Alternative zu dieser numerischen Strömungssimulation (Abschnitt 1.3.2) ist das analytische Modell, das eigens im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelt wurde. Der Modellaufbau und die dem analytischen Modell zugrundeliegenden Annahmen sind in WESTERMANN et al. (2018) erläutert und werden im Folgenden zusammenfassend wiedergegeben. Ziel war es, ein analytisches Modell zu entwickeln, welches das zu untersuchende Untertagebergwerk sowie dessen Umfeld vereinfacht darstellt und daher eine nicht derart umfangreiche Kenntnis über die räumliche Verteilung der hydrogeologischen und bergbaulichen Eigenschaften voraussetzt, wie es für numerische Modelle oftmals erforderlich ist.

Durch die Möglichkeit der systematischen Variation der Modelleingangsdaten lassen sich die Entwicklungen der Grubenwasser(druck)fläche in einem Schacht sowie der Zuflussrate in das Untertagebergwerk zu vorgegebenen Bedingungen modellieren (Variantenrechnung). Daher ist das analytische Modell als Werkzeug geeignet, die Sensitivität des analytischen Modells auf die Variation ausgewählter natürlicher sowie anthropogener Faktoren auf den Grubenwasseranstiegsprozess quantitativ zu bestimmen.

Die Bergwerke Ibbenbüren (Abbaubereich „Westfeld“; im Folgenden als „Bergwerk Ibbenbüren“ bezeichnet), Königsborn und Westfalen dienten als Untersuchungsgebiete (Abschnitt 5). Die Aussagen beschränken sich auf die Einflussnahme der Modelleingangsdaten (Faktoren) auf den Grubenwasseranstiegsverlauf und die Entwicklung der Zuflussrate. Veränderungen der hydrochemischen Beschaffenheit bleiben unberücksichtigt.

6.2 Modellaufbau und Modellannahmen

Der Code des analytischen Modells (geschrieben in Delphi V. 6, Borland [heute Embarcadero Technologies]) basiert auf vereinfachten Annahmen zum Aufbau eines Untertagebergwerks sowie auf den analytischen Methoden der Grundwasserdynamik (WESTERMANN et al. 2018; WESTERMANN et al. 2019). SADOVENKO & RUDAKOV (2010) beschreiben die konzeptionelle Modellvorstellung wie folgt, die auch im vorliegenden Fall gültig ist (Abbildung 26):

- Das Untertagebergwerk ist hydraulisch von den umliegenden Untertagebergwerken isoliert, d. h., dass keine hydraulisch wirksamen Verbindungen (z. B. Strecken) zu benachbarten Untertagebergwerken existieren. Offene untertägige Strecken oder wasserdurchlässige Schichten können jedoch in der Wasserbilanz eines Untertagebergwerks berücksichtigt werden (z. B. lateraler Abfluss über die Schichten des Turoniums und Cenomaniums am Beispiel des Bergwerks Königsborn, Abschnitt 5.4.2).
- Das Untertagebergwerk entwässert über einen Schacht, der den wasserführenden Bereich vollkommen erschließt. Das Einzugsgebiet der Wasserhaltung wird in eine radiale Form überführt, deren Flächengröße der Größe des tatsächlichen Einzugsgebiets entspricht (Abbildung 29). Der Schacht liegt im geometrischen Zentrum dieses Kreises. Abweichende Positionen des Schachts vom geometrischen Zentrum können berücksichtigt werden (z. B. Schacht Königsborn 4 des Bergwerks Königsborn; Abschnitt 5.4.1).
- Sämtliche Strecken und Schächte eines Grubengebäudes sind uneingeschränkt miteinander hydraulisch verbunden. Die Grubenwasser(druck)fläche steigt daher gleichmäßig im gesamten Grubengebäude an.
- Die vertikale Verteilung der hydrogeologischen und bergbaulichen Kenndaten ist in Abhängigkeit von den geologischen Schichten und den bergbaulichen Aktivitäten heterogen und je Schicht definiert.
- Die Schichten sind söhlig gelagert. Die hydrogeologischen und bergbaulichen Kenndaten sind innerhalb einer definierten Schicht homogen verteilt. Die Mächtigkeit einer Schicht verändert sich nicht.

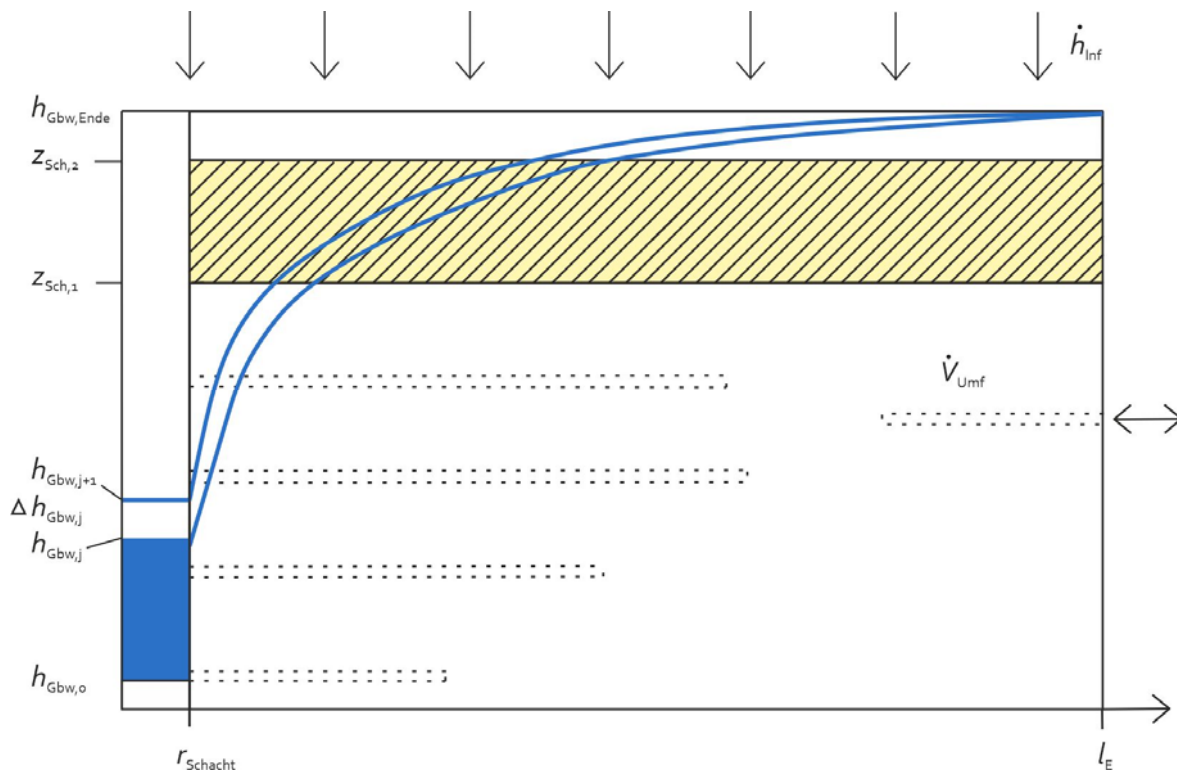


Abbildung 26: Schematischer Profilschnitt zur Erläuterung der konzeptionellen Modellvorstellung (verändert nach WESTERMANN et al. 2018).

Erläuterung der Formelzeichen in Abbildung 26: $h_{\text{Gbw,Ende}}$: Grubenwasser(druck)fläche nach Abschluss des Grubenwasseranstiegs (m NHN); z_{Sch} : Teufenlage der Schichtgrenzen lithologischer Einheiten (m NHN); $h_{\text{Gbw},0}$: Grubenwasser(druck)fläche zu Beginn des Grubenwasseranstiegs (m NHN); $h_{\text{Gbw},j}$: Grubenwasser(druck)fläche zum Zeitpunkt t_j (m NHN); $h_{\text{Gbw},j+1}$: Grubenwasser(druck)fläche zum Zeitpunkt t_{j+1} (m NHN); $\Delta h_{\text{Gbw},j}$: Betrag des Grubenwasseranstiegs innerhalb eines Zeitintervalls Δt_j (m); \dot{h}_{Inf} : flächenspezifische vertikale Infiltrationsspende ($\text{m}^3/(\text{min} \times \text{m}^2)$); \dot{V}_{Umf} : Abflussrate aus einem Grubengebäude bzw. Zuflussrate in ein Grubengebäude (m^3/min).

6.3 Verwendete hydrogeologische Gleichungen

Bei der Grund- und Grubenwasserströmung handelt es sich um eine Potenzialströmung mit der Grund- und Grubenwasser(druck)höhe als Potenzial (HÖLTING & COLDEWEY 2013). Das analytische Modell berechnet die instationäre, radiale Grundwasserströmung zu einem Schacht. Die zeitliche Veränderung der Grubenwasser(druck)fläche im Schacht wird mit folgender modifizierter Differenzialgleichung nach BOUSSINESQ beschrieben (zitiert in BEAR & BACHMAT 1991). Terme für die Bilanzströme \dot{h}_{Inf} (flächenspezifische vertikale Infiltrationsspende) und \dot{h}_{Umf} (Abflussrate aus einem Grubengebäude bzw. Zuflussrate in ein Grubengebäude bzw. in ein benachbarte(n) Grubengebäude) ergänzen diese Differenzialgleichung (Gleichung 37).

$$\frac{\partial(n_{\text{Peff}} \times h_{\text{Gw}})}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial l} \left(k_f \times h_{\text{Gw}} \times r \frac{\partial h_{\text{Gw}}}{\partial r} \right) + \dot{h}_{\text{Inf}} \pm \dot{V}_{\text{Umf}} \quad 37$$

mit

n_{Peff}	=	speichernutzbare (effektive) Porosität (1) mit $n_{\text{Peff}} = n_{\text{Peff,GB}} + V_{\text{RHV}}$ $n_{\text{Peff,GB}}$ = speichernutzbare (effektive) Porosität des Gebirges (GB = Gebirge; 1), V_{RHV} = bergmännisch geschaffenes Resthohlraumvolumen (1),
h_{Gw}	=	Grundwasser(druck)fläche (m NHN),
k_f	=	Durchlässigkeitskoeffizient (m/min),
l	=	räumliche Variable der Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs mit $l_{\text{GG}} < l_E < l_{E,\text{max}}$ (m),
t	=	Zeitdauer (min),
\dot{h}_{Inf}	=	flächenspezifische vertikale Infiltrationsspende (m/min),
\dot{V}_{Umf}	=	Abflussrate aus einem Grubengebäude ($-\dot{V}_{\text{Umf}}$) bzw. Zuflussrate in ein Grubengebäude ($+\dot{V}_{\text{Umf}}$ m ³ /min).

Die Veränderung der Grubenwasser(druck)fläche wird innerhalb des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs bestimmt, der sich vom sogenannten inneren Rand mit der Strecke l_{GG} (Gleichung 39) bis zum äußeren Rand mit der Strecke l_E ausdehnt (Abbildung 26 und Abbildung 28; Abschnitt 4.3.5 und Abschnitt 6.4.5). Die Strecke l_{GG} beschreibt dabei den mittleren Radius der Fläche, die durch das Streckensystem eines Untertagebergwerks erschlossen wird (Gleichung 38). Es stellt im weitesten Sinne das Drainagesystem des Untertagebergwerks dar. Die Fläche wird in eine Kreisform mit vergleichbarer Flächengröße überführt (Abbildung 29).

$$l_{\text{GG}} = \sqrt{\frac{A_{\text{RHV}}}{\pi}} \quad 38$$

mit

l_{GG}	=	mittlere Ausdehnung des Grubengebäudes, vom Schacht ausgehend betrachtet (innerer Rand; m),
A_{RHV}	=	mittleres (bergmännisch geschaffenes) Resthohlraumvolumen je m (m ³ /m) mit $A_{\text{RHV}} = \frac{V_{\text{RHV},2-1}}{z_{\text{Schicht},2} - z_{\text{Schicht},1}}$ $V_{\text{RHV},2-1}$ = bergmännisch geschaffenes Resthohlraumvolumen im Teufenbereich zwischen den Schichten $z_{\text{Sch},1}$ und $z_{\text{Sch},2}$ (m ³), z_{Sch} = Teufenlage der Schichtgrenzen lithologischer Einheiten; $z_{\text{Sch},2} > z_{\text{Sch},1}$ (m NHN).

Die Grundwasser(druck)fläche $h_{\text{Gw,GG}}$ am inneren Rand ändert sich simultan mit der Grubenwasser(druck)fläche h_{Gbw} im Schacht sowie dem angeschlossenen Grubengebäude (Gleichung 39). Die Grundwasser(druck)fläche entspricht daher annähernd der Grubenwasser(druck)fläche.

$$h_{\text{GW,GG}}(l_{\text{GG}}, t_j) = h_{\text{Gbw}}(t_j) \quad 39$$

mit

$$\begin{aligned} h_{\text{GW,GG}}(l_{\text{GG}}, t_j) &= \text{Grundwasser(druck)fläche am inneren Rand zum Zeitpunkt } t_j \text{ (m NHN),} \\ h_{\text{Gbw}}(t_j) &= \text{Grubenwasser(druck)fläche zum Zeitpunkt } t_j \text{ (m NHN).} \end{aligned}$$

Die Grubenwasser(druck)fläche am Rand des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs bleibt hingegen über die gesamte Dauer des Grubenwasseranstiegs unverändert ($h_{\text{GW}} = \text{konstant}$; Gleichung 40).

$$h_{\text{Gbw}}(l_E, t_j) = h_{\text{GW,l}} \quad 40$$

mit

$$\begin{aligned} h_{\text{Gbw}} &= \text{Grubenwasser(druck)fläche am Rand des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs zum} \\ &\quad \text{Zeitpunkt } t_j \text{ (m NHN),} \\ h_{\text{GW,l}} &= \text{Grundwasser(druck)fläche am Rand des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs} \\ &\quad \text{(m NHN).} \end{aligned}$$

Da die Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs aufgrund der Heterogenität des Untergrunds und des zumeist unzureichend genauen Messnetzes nicht exakt bemessen werden kann, beruht dieser Faktor auf Annahmen (Abschnitt 4.3.5). Die Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs wird im Abschnitt 6.4.5 rechnerisch hergeleitet.

Anstelle der Berechnung der instationären Grundwasserströmung (Gleichung 37) wird die Gesamtdauer des Grubenwasseranstiegs in eine Anzahl j gleicher Zeitschritte der Dauer t_j unterteilt ($\Delta t_j = \frac{t_{\text{Grubenwasseranstieg}}}{j}$). Die stationäre (mittlere) Grubenwasser(druck)fläche am inneren Rand wird für jedes der j -Zeitintervalle iterativ berechnet (Gleichung 41).

$$\Delta h_{\text{Gbw},j} = \frac{\Delta V_{\Sigma,j} - (\dot{V}_{\text{Umf},j} \times \Delta t_j) - \Delta V_{\text{GBf},j}(\Delta h_{\text{Gbw},j})}{A_{\text{RHV}}} \quad 41$$

mit

$$\begin{aligned} \Delta h_{\text{Gbw},j} &= \text{Grubenwasseranstieg innerhalb des Zeitintervalls } \Delta t_j \text{ (m),} \\ \Delta V_{\Sigma,j} &= \text{Gesamtvolumen des zufließenden Wassers innerhalb des Zeitintervalls } \Delta t_j \text{ (m}^3\text{),} \\ \dot{V}_{\text{Umf},j} &= \text{Abflussrate aus einem Grubengebäude bzw. Zuflussrate in ein Grubengebäude innerhalb} \\ &\quad \text{des Zeitintervalls } \Delta t_j \text{ (m}^3\text{/d),} \\ \Delta t_j &= \text{Zeitintervall (min),} \\ \Delta V_{\text{GBf},j} &= \text{Hohlraumvolumen des Gebirges, welches innerhalb des Zeitintervalls } \Delta t_j \text{ geflutet wird} \\ &\quad \text{(m}^3\text{),} \\ &\quad \text{(Anm.: da dieser Faktor vom Grubenwasseranstieg } (\Delta h_{\text{Gbw},j}) \text{ abhängig ist, wird die} \\ &\quad \text{Gleichung 41 iterativ gelöst),} \\ A_{\text{RHV}} &= \text{mittleres (bergmännisch geschaffenes) Resthohlraumvolumen je m (m}^3\text{/m).} \end{aligned}$$

Abschnitt 6.3 – Verwendete hydrogeologische Gleichungen

Die Grubenwasser(druck)fläche des nächsten Intervalls ($t_j + 1$) wird durch Addition des Anstiegsbetrags $\Delta h_{\text{Gbw},j}$ auf die Grubenwasser(druck)fläche zum vorherigen Zeitpunkt t_j berechnet (Gleichung 42).

$$h_{\text{Gbw},j+1} = h_{\text{Gbw},j} + \Delta h_{\text{Gbw},j} \quad 42$$

mit

$$\begin{aligned} h_{\text{Gbw},j+1} &= \text{Grubenwasser(druck)fläche zum Zeitpunkt } j+1 \text{ (m),} \\ h_{\text{Gbw},j} &= \text{Grubenwasser(druck)fläche zum Zeitpunkt } j \text{ (m),} \\ \Delta h_{\text{Gbw},j} &= \text{Grubenwasseranstieg innerhalb des Zeitintervalls } \Delta t_j \text{ (m).} \end{aligned}$$

Neben der Grubenwasser(druck)fläche wird zudem die Wasserbilanz aus Zu- und Abflussraten für jedes Zeitintervall Δt_j ermittelt (Gleichung 43). Die Wasserbilanz setzt sich aus der Infiltrationsrate, dem Volumenstrom von Tiefenwasser sowie aus der Abflussrate aus einem benachbarten Grubengebäude bzw. der Zuflussrate in das Grubengebäude zusammen.

$$\Delta \dot{V}_{\Sigma,j} = (\dot{V}_{\text{Inf}} + \dot{V}_{\text{Tw}}) \pm \dot{V}_{\text{Umf}} \quad 43$$

mit

$$\begin{aligned} \Delta \dot{V}_{\Sigma,j} &= \text{Wasserbilanz aus Zu- und Abflussrate innerhalb eines Grubengebäudes (m³/min),} \\ \dot{V}_{\text{Inf}} &= \text{Infiltrationsrate (m³/min),} \\ \dot{V}_{\text{Tw}} &= \text{Volumenstrom von Tiefenwasser (m³/min),} \\ \dot{V}_{\text{Umf}} &= \text{Abflussrate aus einem Grubengebäude } (-\dot{V}_{\text{Umf}} \text{ bzw. Zuflussrate in ein Grubengebäude } (+\dot{V}_{\text{Umf}}; \text{ m³/min).} \end{aligned}$$

Der Volumenstrom von Tiefenwasser \dot{V}_{Tw} in das Grubengebäude wird unter Anwendung der Gleichung von THIEM (1906) in Anlehnung an DUPUIT (1863) für die Grundwasserströmung für freies Grundwasser errechnet (HÖLTING & COLDEWEY 2013; Gleichung 44).

$$\dot{V}_{\text{Tw},\Delta t} = \pi \times k_{f,\Delta t} \times \frac{h_{\text{Gbw},j}^2 - h_{\text{Gw},l_E}^2}{\ln\left(\frac{l_E}{l_{\text{GG}}}\right)} \quad 44$$

mit

$$\begin{aligned} \dot{V}_{\text{Tw},\Delta t} &= \text{horizontale Zuflussrate von Tiefenwasser während des Zeitintervalls } \Delta t_j \text{ (m³/s),} \\ k_{f,\Delta t} &= \text{mittlerer Durchlässigkeitskoeffizient für das Gestein zwischen der unteren und oberen Grubenwasser(druck)fläche während des Zeitintervalls } \Delta t \text{ (m/s; Gleichung 45),} \\ h_{\text{Gbw},j} &= \text{Grubenwasser(druck)fläche zum Zeitpunkt } t_j \text{ (m NHN),} \\ h_{\text{Gw},l_E} &= \text{Grundwasser(druck)fläche am Rand des hydr. wirksamen Einflussbereichs (m NHN),} \\ l_E &= \text{Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs (Absenkungstrichter; m),} \\ l_{\text{GG}} &= \text{mittlere Ausdehnung des Grubengebäudes innerer Rand; m).} \end{aligned}$$

Abschnitt 6.3 – Verwendete hydrogeologische Gleichungen

Der in der Gleichung 44 berücksichtigte Durchlässigkeitskoeffizient beschreibt den mittleren Wert für das Gestein zwischen der unteren und oberen Grubenwasser(druck)fläche während des Zeitintervalls Δt_j . Dadurch kann die vertikale Heterogenität der hydraulischen Durchlässigkeit berücksichtigt werden, die durch den Wechsel unterschiedlich durchlässiger Schichten sowie bergbaulicher Intensität bedingt ist (Abschnitt 4.2.2). Der Durchlässigkeitskoeffizient errechnet sich wie folgt (Gleichung 45):

$$k_{f,\Delta t} = \frac{1}{h_{\text{Gbw},j+1} - h_{\text{Gbw},j}} \int_{h_{\text{Gbw},j}}^{h_{\text{Gbw},j+1}} k_f(z) dz \quad 45$$

mit

$k_{f,\Delta t}$	=	mittlerer Durchlässigkeitskoeffizient für das Gestein zwischen der unteren und oberen Grubenwasser(druck)fläche während des Zeitintervalls Δt_j (m/min),
$h_{\text{Gbw},j+1}$	=	Grubenwasser(druck)fläche zum Zeitpunkt t_{j+1} (m NHN),
$h_{\text{Gbw},j}$	=	Grubenwasser(druck)fläche zum Zeitpunkt t_j (m NHN),
z	=	Teufe (m NHN).

Die Infiltrationsrate \dot{V}_{Inf} aus dem Hangenden errechnet sich gemäß der Gleichung 18 und Gleichung 19; es wird auf die Ausführung im Abschnitt 4.2.4 verwiesen.

Zwar gelten die Berechnungen für hydraulisch isolierte Untertagebergwerke (Abschnitt 6.2; erster Punkt). Allerdings kann Grubenwasser auch in Richtung eines benachbarten Untertagebergwerks abfließen, in dem der Grubenwasserstand durch eine Wasserhaltungsmaßnahme tiefer liegt. Diese Situation liegt u. a. für das Bergwerk Königsborn vor, in dem der Grubenwasseranstieg nahezu abgeschlossen ist, während die Grubenwasser(druck)fläche im nördlich angrenzenden Bergwerk Ost > 900 m tiefer liegt. Die Berechnung der Abflussrate unterscheidet sich für drei Phasen (Abbildung 27):

- **Phase 1:** Die Grubenwasser(druck)fläche liegt innerhalb der (geringer durchlässigen) Schichten des Oberkarbons und unterhalb der Sohle der durchlässigen Schicht des Turoniums und Cenomaniums ($h_{\text{Gbw},\text{KB}} < z_{\text{Sch},1}$; Abbildung 27).

$$\dot{V}_{\text{Umf}} = k_{f,K} \times \frac{h_{\text{Gbw},\text{KB}}^2 - h_{\text{Gbw},\text{Ost}}^2}{2 \times l_{\text{GB}}} \times l_{\text{Zufluss}} \quad 46$$

mit

\dot{V}_{Umf}	=	Abflussrate aus einem Grubengebäude bzw. Zuflussrate in ein Grubengebäude (m³/min),
$k_{f,K}$	=	Durchlässigkeitskoeffizient der Schichten des Oberkarbons (m/min),
$h_{\text{Gbw},\text{KB}}$	=	Grubenwasser(druck)fläche im Bergwerk Königsborn (m NHN),
$h_{\text{Gbw},\text{Ost}}$	=	Grubenwasser(druck)fläche im Bergwerk Ost (m NHN),
l_{GB}	=	Strecke des ungestörten Gebirges zw. den benachbarten Untertagebergwerken (m),
l_{Zufluss}	=	Länge der Zustrombreite (m).

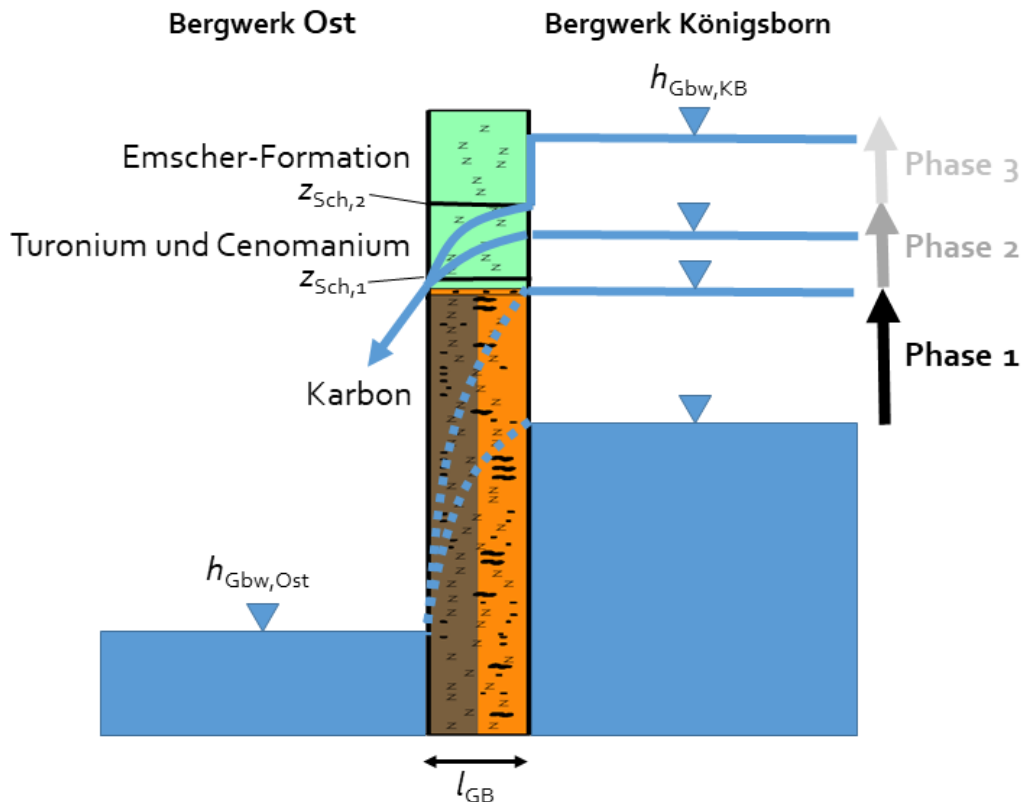


Abbildung 27: Schematische Darstellung zur Erläuterung der Berechnung der Abflussrate in Richtung eines entwässerten Untertagebergwerks (hier: Bergwerk Ost).

- **Phase 2:** Die Grubenwasser(druck)fläche liegt innerhalb der (durchlässigen) Schichten des Turoniums und Cenomaniums ($z_{Sch,1} < h_{Gbw,KB} < z_{Sch,2}$; Abbildung 27). Wasser strömt sowohl über die Schichten des Oberkarbons als auch aus den Schichten des Turoniums und Cenomaniums in das Grubengebäude. Die Abflussrate für ungespanntes Grundwasser errechnet sich, indem die Zuflussraten aus den jeweiligen Schichten addiert werden (BEAR et al. 1968; TRESKATIS 2017):

$$\dot{V}_{Umf} = k_{f,K} \times \frac{h_{Gbw,KB}^2 - h_{Gbw,Ost}^2}{2 \times l_{GB}} \times l_{Zufluss} + k_{f,T+C} \times \frac{h_{Gbw,KB}^2 - z_{Sch,1}^2}{2 \times l_{GB}} \times l_{Zufluss} \quad 47$$

mit

\dot{V}_{Umf}	=	Abflussrate aus einem Grubengebäude bzw. Zuflussrate in ein Grubengebäude (m ³ /min),
$k_{f,K}$	=	Durchlässigkeitskoeffizient der Schichten des Oberkarbons (m/s),
$h_{Gbw,KB}$	=	Grubenwasser(druck)fläche im Bergwerk Königsborn (m NHN),
$h_{Gbw,Ost}$	=	Grubenwasser(druck)fläche im Bergwerk Ost (m NHN),
l_{GB}	=	Strecke des ungestörten Gebirges zwischen den benachbarten Untertagebergwerken (m),
$l_{Zufluss}$	=	Länge der Zustrombreite (m),
$k_{f,T+C}$	=	Durchlässigkeitskoeffizient der Schichten des Turoniums und Cenomaniums (m/min),
$z_{Sch,1}$	=	Teufenlage der liegenden Schichtgrenze (m NHN).

- **Phase 3:** Die Grubenwasser(druck)fläche liegt innerhalb der (undurchlässigen) Schichten der Emscher-Formation und somit oberhalb der Hangendgrenze der (durchlässigen) Schichten des Turoniums und Cenomaniums ($h_{\text{Gbw,KB}} > z_{\text{Sch,2}}$; Abbildung 27). Die Abflussrate errechnet sich für gespanntes Grundwasser in den Schichten des Turoniums und Cenomaniums wie folgt:

$$\dot{V}_{\text{Umf}} = k_{f,K} \times \frac{h_{\text{Gbw,KB}}^2 - h_{\text{Gbw,Ost}}^2}{2 \times l_{\text{GB}}} \times l_{\text{Zufluss}} + k_{f,T+C} \times \frac{z_{\text{Sch,2}} - z_{\text{Sch,1}}}{2} \times \frac{h_{\text{Gbw,KB}} - z_{\text{Sch,1}}}{l_{\text{GB}}} \times l_{\text{Zufluss}} \quad 48$$

mit Ergänzung der Legende zur Gleichung 47:

$z_{\text{Sch,2}}$ = Teufenlage der hangenden Schichtgrenze (m NHN)
 $(z_{\text{Sch,2}} - z_{\text{Sch,1}})$ = mittlere Mächtigkeit der Schichten des Turoniums und Cenomaniums [m].

Die Grubenwasser(druck)fläche steigt, indem Wasser in die Hohlräume des Untergrunds fließt und diese flächenhaft gleichmäßig füllt (Annahme der vollständigen hydraulischen Verbindung!). Das Volumen, das für die Speicherung des zufließenden Wassers zur Verfügung steht, setzt sich aus den Hohlräumen des Gebirges sowie des Grubengebäudes zusammen (Gleichung 49).

$$\Delta V_{\Sigma,j} = \Delta V_{\text{GBf},j} + \Delta V_{\text{RHHV},j} \quad 49$$

mit

$\Delta V_{\Sigma,j}$ = Gesamtvolumen des zufließenden Wassers zum Zeitpunkt t_j (m³),
 $\Delta V_{\text{GBf},j}$ = Hohlraumvolumen des Gebirges, welches im Zeitintervall Δt_j geflutet wird (m³),
 mit $\Delta V_{\text{GBf},j} = \pi \times l_{E,j}^2 \times \Delta h_{\text{Gbw},j} \times n_{\text{Peff},j}$
 $l_{E,j}$ = Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs im Zeitintervall Δt_j (m),
 $\Delta h_{\text{Gbw},j}$ = Grubenwasseranstieg innerhalb eines Zeitintervalls Δt_j (m),
 n_{Peff} = speichernutzbare (effektive) Porosität (1),
 $\Delta V_{\text{RHHV},j}$ = bergmännisch geschaffenes Resthohlraumvolumen des Grubengebäudes, welches im Zeitintervall Δt_j geflutet wird (m³)
 mit $\Delta V_{\text{RHHV},j} = A_{\text{RHHV},j} \times \Delta h_{\text{Gbw},j}$
 $A_{\text{RHHV},j}$ = mittleres (bergmännisch geschaffenes) Resthohlraumvolumen je m im Zeitintervall Δt_j (m³/m),
 $\Delta h_{\text{Gbw},j}$ = Grubenwasseranstieg innerhalb eines Zeitintervalls Δt_j (m).

Die oben beschriebene Vorgehensweise für die Berechnung der Grubenwasser(druck)fläche und der Wasserbilanz wird für j -Zeitintervalle wiederholt durchgeführt (Iteration; Abbildung 26), bis die Grubenwasser(druck)fläche das endgültige Niveau erreicht und der Grubenwasseranstieg abgeschlossen ist.

6.4 Ermittlung der Modelleingangsdaten

6.4.1 Allgemeines

Die Modellierung des Grubenwasseranstiegs sowie der Zuflussrate setzt die Eingabe von Modelleingangsdaten (Faktoren) voraus, die das zu flutende Untertagebergwerk hinsichtlich seiner hydrogeologischen und bergbaulichen Eigenschaften hinreichend genau beschreibt. Die erforderlichen Daten können u. a. in Archiven recherchiert oder im Gelände und Labor erhoben werden. Die Beschaffung der Modelleingangsdaten erweist sich allerdings oftmals als sehr zeit- und kostenintensiv. Diese sind stets standortspezifisch und oftmals nur lokal gültig. Die hydrogeologischen und bergbaulichen Kenndaten variieren oftmals erheblich innerhalb eines Untersuchungsgebiets. Auch zeigt sich, dass die Genauigkeit und Übertragbarkeit der Werte (z. B. in Laboren erhobene Werte) mit einer hohen Unsicherheit behaftet ist. Es empfiehlt sich daher, Wertespannbreiten für die jeweiligen Modelleingangsdaten anzugeben.

Die erforderlichen Modelleingangsdaten können durch Geländeversuche in situ (z. B. Pumpversuch zur Bestimmung des Durchlässigkeitskoeffizienten) oder im kleinen Maßstab mittels Laborversuchen (z. B. Wasserverdrängungsversuch zur Bestimmung der Porosität in Lockersedimenten) bestimmt werden. Ist die Durchführung von Geländeversuchen nicht möglich oder aber Probenmaterial für Laborversuche nicht vorhanden, so können die Modelleingangsdaten durch Analogieschluss mit vergleichbaren Untertagebergwerken abgeschätzt werden. Andere Modelleingangsdaten wie Hohlraumvolumina des Grubengebäudes sind u. a. aus markscheiderischen Risswerken zu entnehmen (Abschnitt 4.3.2). Sind Modelleingangsdaten weder messbar noch in Unterlagen verzeichnet, stützt sich die Modellierung auf Annahmen, die zu begründen sind.

Für das analytische Modell werden Modelleingangsdaten verwendet, für die Unterlagen (Daten, Berichte, Pläne) verfügbar waren bzw. belastbare Annahmen (z. B. durch Analogieschluss) getroffen werden konnten. Es wurden keine neuen Daten erhoben. Die Vorgehensweise bei der Festlegung der jeweiligen Wertespannbreite sowie die Quelle der jeweiligen Daten werden im Folgenden beschrieben.

6.4.2 Durchlässigkeitskoeffizient

Unter Zugrundelegung von Literaturwerten für den Durchlässigkeitskoeffizienten (Abschnitt 4.2.2) wird die maximale Wertespannbreite festgelegt, innerhalb der die für die

Abschnitt 6.4 – Ermittlung der Modelleingangsdaten

Modellierung verwendeten Werte liegen sollten (Tabelle 18). Die maximale Wertespannbreite für die Schichten der Oberkreide (ausgenommen: Emscher-Formation) und des Oberkarbons beschreibt BALTES et al. (1998). WENDLAND et al. (2002) geben die maximale Wertespannbreite für den Durchlässigkeitskoeffizienten der Emscher-Formation an. Die Werte in JÄGER et al. (1990), COLDEWEY et al. (1997), PAAS (1997) und DENNEBORG et al. (2017) liegen innerhalb der in Tabelle 18 aufgeführten Wertespannbreiten bzw. sind mit diesen deckungsgleich (Anhang 1).

Der maximale Durchlässigkeitskoeffizient für die Emscher-Formation ($< 9 \times 10^{-5}$ m/s) in WENDLAND et al. (2002) gilt lediglich für den oberen geklüfteten Bereich mit einer Mächtigkeit von < 50 m. Der geklüftete Bereich wird für die Modellierung nicht berücksichtigt, da dieser – im Vergleich zur hohen Gesamtmächtigkeit der Emscher-Formation im zentralen Ruhrgebiet (Bergwerke Königsborn und Westfalen) – nur einen kleinen vertikalen Ausschnitt darstellt und für den Verlauf des Grubenwasseranstiegs keine Relevanz besitzt. Für den angrenzenden (gestörten [verritzten]) Bereich im Liegenden (Teufe der Strecke -10 m) und im Hangenden der Strecken (Teufe der Strecke $+10$ m) wird eine erhöhte hydraulische Durchlässigkeit angenommen (Tabelle 18; BALTES et al. 1998). Die Teufenlagen der Streckenanschlüsse an den Schächten, die zur Messung der Grubenwasser(druck)fläche dienen, sind in der Tabelle 19 zusammengestellt.

Tabelle 18: Wertespannbreiten für die Durchlässigkeitskoeffizienten k_f ([1] aus WENDLAND et al. 2002; [2] aus BALTES et al. 1998).

Stratigraphie	Durchlässigkeitskoeffizient k_f m/s
Oberkreide, Coniac und Santon, Tonmergelstein (Emscher-Formation)	$1 \times 10^{-11} \dots 7 \times 10^{-10}$ (1)
Oberkreide, Turonium und Cenomanium, Kalkmergel- und Mergelkalkstein	$1 \times 10^{-7} \dots 1 \times 10^{-6}$ (2)
Oberkreide, Cenomanium, Grünsand	$1 \times 10^{-7} \dots 1 \times 10^{-6}$ (2)
Oberkarbon, Wechselfolge aus Sand- und Tonsteinen mit Flözen (unverritzt)	$3 \times 10^{-10} \dots 1 \times 10^{-7}$ (2)
Oberkarbon, Wechselfolge aus Sand- und Tonsteinen mit Flözen (verritzt)	$1 \times 10^{-9} \dots 1 \times 10^{-6}$ (2)

Tabelle 19: Teufenlagen der Streckenanschlüsse an den Schächten.

Bergwerk Ibbenbüren		Bergwerk Königsborn		Bergwerk Westfalen	
Wilhelm-Schacht		Schacht Königsborn 4		Schacht Westfalen 7	
[m u. GOK]	[m NHN]	[m u. GOK]	[m NHN]	[m u. GOK]	[m NHN]
60,0	65,0	324,5	−255,3	1.035,0	−952,7
207,0	−82,0	451,3	−382,0	1.330,0	−1.247,7
		571,4	−502,1		
		726,3	−657,1		
		786,2	−717,0		
		966,3	−897,1		

Bemerkung: Bergwerk Ibbenbüren: aus GOERKE-MALLET (2000); tiefer gelegene Streckenanschlüsse konnten nicht recherchiert werden. Bergwerk Königsborn: aus CLOSTERMANN et al. (1997). Bergwerk Westfalen: aus RÜTERKAMP et al. (2000).

Im analytischen Modell werden die Schichten und Streckenanschlüsse entsprechend der vertikalen Teufenlage anhand der Schachtverzeichnisse der Bergwerke Ibbenbüren (Abschnitt 5.3.1), Königsborn (Abbildung 19; Abschnitt 5.4.1) und Westfalen abgegrenzt (Abbildung 23; Abschnitt 5.5.1). Diesen Schichten werden die entsprechenden Wertespannbreiten der Durchlässigkeitskoeffizienten zugeordnet und mit der dazugehörigen Schichtmächtigkeit multipliziert. Die sich daraus ergebenen minimale und maximale Transmissivitätskoeffizienten werden aufsummiert und durch die Gesamtmächtigkeit des mit Grubenwasser erfüllten Untergrunds (d. h. bis zur aktuellen Grubenwasser[druck]fläche) wieder dividiert. Dadurch ergeben sich entsprechend der Schichtmächtigkeiten gewichtete minimale und maximale Durchlässigkeitskoeffizienten (Gleichung 50; Gleichung 51). Die teufenspezifische Verteilung der Durchlässigkeits- und Transmissivitätskoeffizienten sowie deren Wertespannbreiten sind dem Anhang 5 sowohl in tabellarischer als auch graphischer Form zu entnehmen.

$$\bar{k}_{f,\min} = \frac{\sum_1^i k_{f,\min,\text{Sch}} \times h_{M,\text{Sch}}}{h_{M,\text{Gbw}}} \quad 50$$

$$\bar{k}_{f,\max} = \frac{\sum_1^i k_{f,\max,\text{Sch}} \times h_{M,\text{Sch}}}{h_{M,\text{Gbw}}} \quad 51$$

mit

$$\begin{aligned} \bar{k}_{f,\min} &= \text{gewichteter minimaler Mittelwert der Durchlässigkeitskoeffizienten (m/s),} \\ k_{f,\min,\text{Sch}} &= \text{minimaler Durchlässigkeitskoeffizient einer Schicht (m/s),} \\ h_{M,\text{Sch}} &= \text{Schichtmächtigkeit (m),} \\ h_{M,\text{Gbw}} &= \text{Mächtigkeit des mit Grubenwasser erfüllten Untergrunds (m)} \\ &\quad (h_{M,\text{Gbw}} = h_{\text{Gbw,akt}} - h_{\text{Gbw,o}} \\ &\quad h_{\text{Gbw,akt}} = \text{aktuelle Grubenwasser[druck]fläche [m NHN],} \\ &\quad h_{\text{Gbw,o}} = \text{Grubenwasser[druck]fläche zu Beginn des Grubenwasseranstiegs [m NHN]),} \\ \bar{k}_{f,\max} &= \text{gewichteter maximaler Mittelwert der Durchlässigkeitskoeffizienten (m/s),} \\ k_{f,\max,\text{Sch}} &= \text{maximaler Durchlässigkeitskoeffizient einer Schicht (m/s).} \end{aligned}$$

Für die Bergwerke Königsborn und Westfalen wird der harmonische Mittelwert aus den (gewichteten) minimalen und maximalen Durchlässigkeitskoeffizienten gebildet (Gleichung 52). Dieser beschreibt nach JANG et al. (2011) am ehesten die Verteilung der Durchlässigkeitskoeffizienten eines orthogonal zur Schichtung durchströmten Untergrunds.

$$\bar{k}_f = \frac{\sum_{N=1}^{N_W} \frac{N}{k_{f,N}}}{\sum_{N=1}^{N_W} \frac{1}{k_{f,N}}} = \frac{2}{\frac{1}{\bar{k}_{f,\max}} + \frac{1}{\bar{k}_{f,\min}}} \quad 52$$

mit

$$\begin{aligned} \bar{k}_f &= \text{harmonischer Mittelwert der Durchlässigkeitskoeffizienten (m/s),} \\ N_W &= \text{Anzahl der (Mess-)Werte (1),} \\ k_{f,N} &= \text{Einzelwert eines Durchlässigkeitskoeffizienten (m/s),} \\ \bar{k}_{f,\max} &= \text{gewichteter maximaler Mittelwert des Durchlässigkeitskoeffizienten (m/s),} \\ \bar{k}_{f,\min} &= \text{gewichteter minimaler Mittelwert des Durchlässigkeitskoeffizienten (m/s).} \end{aligned}$$

Für das Bergwerk Ibbenbüren dient hingegen der arithmetische Mittelwert aus den (gewichteten) minimalen und maximalen Mittelwerten des Durchlässigkeitskoeffizienten. Dieser Ansatz ist sinnvoll, da der Untergrund hier aufgrund des fehlenden Deckgebirges homogener aufgebaut ist. Die entsprechende Gleichung lautet wie folgt (Gleichung 53):

$$\bar{k}_f = \frac{\sum_{N=1}^{N_W} k_{f,N}}{N_W} = \frac{\bar{k}_{f,\max} + \bar{k}_{f,\min}}{2} \quad 53$$

mit

$$\begin{aligned} \bar{k}_f &= \text{arithmetischer Mittelwert des Durchlässigkeitskoeffizienten (m/s),} \\ N_W &= \text{Anzahl der (Mess-)Werte (1),} \\ k_{f,N} &= \text{Einzelwert eines Durchlässigkeitskoeffizienten (m/s),} \\ \bar{k}_{f,\max} &= \text{gewichteter maximaler Mittelwert des Durchlässigkeitskoeffizienten (m/s),} \\ \bar{k}_{f,\min} &= \text{gewichteter minimaler Mittelwert des Durchlässigkeitskoeffizienten (m/s).} \end{aligned}$$

Den höchsten mittleren Durchlässigkeitskoeffizienten weist das Bergwerk Ibbenbüren auf ($6,7 \times 10^{-8}$ m/s; Tabelle 20), den geringsten das Bergwerk Königsborn ($3,0 \times 10^{-8}$ m/s; Tabelle 20). Die größte Differenz zwischen dem minimalen und maximalen Wert ist dem Bergwerk Königsborn zuzuordnen ($3,2 \times 10^{-7}$ m/s), die geringste dem Bergwerk Ibbenbüren ($1,3 \times 10^{-7}$ m/s; Tabelle 20).

Tabelle 20: Wertespannbreiten der (gewichteten) Durchlässigkeitskoeffizienten der Bergwerke Ibbenbüren (Abbaubereich „Westfeld“), Königsborn und Westfalen.

Untertagebergwerk	gewichtete Durchlässigkeitskoeffizienten		
	$\bar{k}_{f,\min}$ m/s	\bar{k}_f m/s	$\bar{k}_{f,\max}$ m/s
Ibbenbüren	$3,3 \times 10^{-10}$	$6,7 \times 10^{-8}$ (1)	$1,3 \times 10^{-7}$
Königsborn	$1,6 \times 10^{-8}$	$3,0 \times 10^{-8}$ (2)	$3,3 \times 10^{-7}$
Westfalen	$2,8 \times 10^{-8}$	$5,1 \times 10^{-8}$ (2)	$3,4 \times 10^{-7}$

(1) arithmetischer Mittelwert. (2) harmonischer Mittelwert

6.4.3 Flächenspezifische vertikale Infiltrationsspende

Wie in Abschnitt 4.2.4 beschrieben, strömt Infiltrations- und Tiefenwasser entsprechend eines hydraulischen Gefälles in ein entwässertes Untertagebergwerk. Während die Gesamtentnahmemenge, bestehend aus den geogenen Wässern und den von übertage zugeführten Betriebswässern, durch die Wasserhaltung genau bestimmt werden kann, sind die geogenen Zufluss- und Infiltrationsraten in das Untertagebergwerk selten eindeutig bestimm- oder messbar. Daher wird die Infiltrationsrate im Rahmen dieser Arbeit mittels eines mathematischen Verfahrens abgeschätzt, das auf der DARCY-Gleichung basiert. Im analytischen Modell wird angenommen, dass sich die Infiltrationsrate auf eine Fläche gleichmäßig verteilt. Nach DIN 4049-1 (1992) definiert der Zusatz „-spende“ den Quotient aus einer Zuflussrate (z. B. in m³/min) und der Fläche des jeweils betrachteten Gebiets (z. B. in m²). Im Folgenden wird daher dieser Bilanzstrom als „Infiltrationsspende“ bezeichnet.

Die Mächtigkeit sowie lithologische und tektonische Beschaffenheit des Deckgebirges nimmt Einfluss auf die Höhe der Infiltrationsspende (Abschnitt 4.2.6). Aufgrund der deutlich unterschiedlichen Deckgebirgsmächtigkeiten ist die Infiltrationsspende in den Bergwerken Westfalen (hohe Deckgebirgsmächtigkeit), Königsborn (geringe bis mittlere Deckgebirgsmächtigkeit) und Ibbenbüren (kein Deckgebirge) auf unterschiedliche Weise abzuschätzen.

Bergwerk Ibbenbüren

Da das Bergwerk Ibbenbüren durch kein Deckgebirge überlagert wird, setzt sich das Grubenwasser, das nach Abschluss des Grubenwasseranstiegs über den Dickenberger Stollen abgeführt wird, nahezu ausschließlich aus der vertikalen Versickerung von Oberflächenwasser (Infiltrationswasser) zusammen (Abschnitt 5.3.2; DOMALSKI 1987; KORIES et al. 2017a). Die Infiltrationsspende wird wie folgt bestimmt:

$$h_{\text{Inf}} = \frac{\dot{V}_{\text{Inf}}}{A_E} \quad 54$$

mit

h_{Inf} = flächenspezifische vertikale Infiltrationsspende (m/d),
 \dot{V}_{Inf} = Zufluss-, Infiltrationsrate (m³/d),
 A_E = Fläche des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs (m²).

Bei einem langjährigen Mittelwert (1982 bis 2017) von 7,1 m³/min schwanken die Abflussraten zwischen rd. 4 m³/min (10er Perzentil) und rd. 14 m³/min (90er Perzentil; Anhang 6). Bei einer Flächengröße des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs von rd. 28,3 km² (= 28.293.187 m²; $l_{E,\text{erwartet}} = 3.001$ m; Abschnitt 6.4.5) schwanken die Infiltrationsspenden zwischen $2,0 \times 10^{-4}$ m/d und $7,1 \times 10^{-4}$ m/d. Die mittlere Infiltrationsspende beträgt $3,6 \times 10^{-4}$ m/d (Tabelle 21).

Tabelle 21: Wertespannbreiten der Infiltrationsspenden im Bergwerk Ibbenbüren (Abbaubereich „Westfeld“).

Abflussrate am Dickenberger Stollen		Reichweite des Einflussbereichs	Fläche des Einflussbereichs	Infiltrationsspende
[m³/min]	[m³/d]	[m]	[m²]	[m/d]
4,0	5.760	3.001	28.293.187	$2,0 \times 10^{-4}$
7,1	10.224	3.001	28.293.187	$3,6 \times 10^{-4}$
14,0	20.160	3.001	28.293.187	$7,1 \times 10^{-4}$

Bergwerke Westfalen und Königsborn

Für die Bergwerke Westfalen und Königsborn kann die oben beschriebene Vorgehensweise zur Ermittlung der Infiltrationsspende nicht angewendet werden. Die Emscher-Formation gilt großflächig als nahezu undurchlässig, insbesondere dort, wo der Ton- und Mergelanteil im Gestein hoch ist (COLDEWEY et al. 2014). Daher stellt die Emscher-Formation eine hydraulische Barriere zwischen den hydraulischen Verhältnissen in den Schichten des Turoniums und Cenomaniums sowie den wasserführenden Schichten im Hangenden

der Emscher-Formation dar (JÄGER et al. 1990; COLDEWEY et al. 2014). Die Wertespannbreite der Durchlässigkeitskoeffizienten wird in BALTES et al. (1998) mit 1×10^{-11} m/s bis 7×10^{-10} m/s angegeben. Es ist daher anzunehmen, dass die Infiltrationsspende durch die Emscher-Formation gering ist. Diese entspricht (bei freier Zusickerung) dem Durchlässigkeitskoeffizienten der durchströmten, (sehr) schwach durchlässigen Leckageschicht (Abschnitt 4.2.4) und beträgt $1,7 \times 10^{-6}$ m/d (harmonischer Mittelwert aus minimalen und maximalen Durchlässigkeitskoeffizienten).

Aufgrund der hydrogeologischen Gegebenheiten (Abschnitt 5.2) ist anzunehmen, dass Grundwasser aus südlicher bis südöstlicher Richtung über die grundwasserführenden Schichten des Turoniums und Cenomaniums fließt und in das Grubengebäude infiltriert (Abbildung 28).

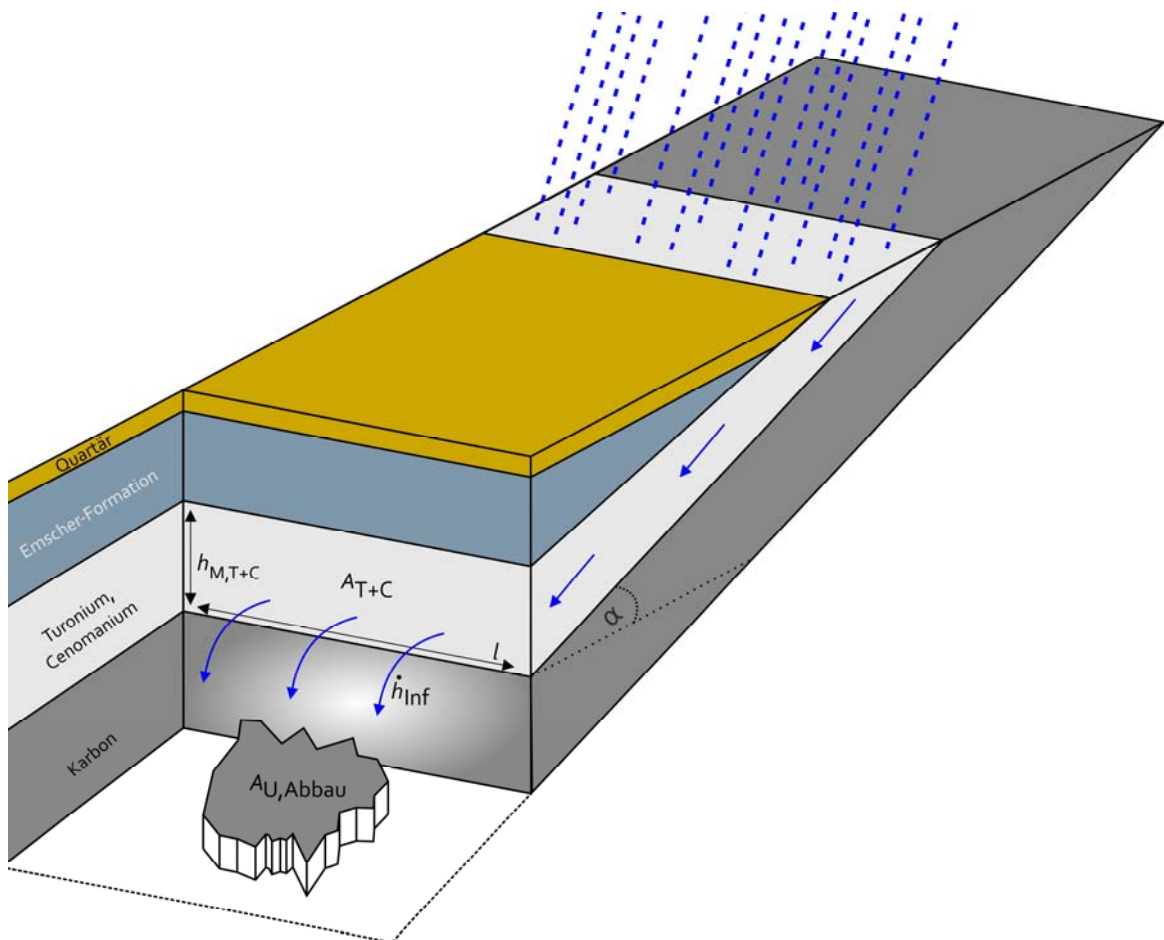


Abbildung 28: Schematische Darstellung zur Erläuterung der Ermittlung der Zufussrate über die Schichten des Turoniums und Cenomaniums in ein Untertagebergwerk.

Abschnitt 6.4 – Ermittlung der Modelleingangsdaten

Die Zuflussrate in das Grubengebäude entlang der südöstlichen Abbaugrenze lässt sich gemäß der abgewandelten DARCY-Gleichung berechnen (Gleichung 55; DARCY 1856).

$$\dot{V}_{T+C} = i \times A_{T+C} \times k_{f,T+C} = i \times l_{\text{Zufluss}} \times h_{M,T+C} \times k_{f,T+C} \quad 55$$

mit

\dot{V}_{T+C}	=	Zuflussrate aus den Schichten des Turoniums und Cenomaniums in das Grubengebäude (m³/d),
i	=	hydraulisches Gefälle (1), (mit $i = \sin \alpha_{T+C}$ α_{T+C} = Einfallwinkel der Schichten des Turoniums und Cenomaniums [Grad]),
A_{T+C}	=	durchströmte Querschnittsfläche der Schichten des Turoniums und Cenomaniums (m²),
l_{Zufluss}	=	Länge der Zustrombreite (m),
$h_{M,T+C}$	=	Mächtigkeit der Schichten des Turoniums und Cenomaniums (m),
$k_{f,T+C}$	=	Durchlässigkeitskoeffizient für die Schichten des Turoniums und Cenomaniums (bergbaulich beeinflusst; Anhang 1; m/s).

Das hydraulische Gefälle wird in der Regel anhand der Grundwasserströmung ermittelt. Allerdings liegt dem Verfasser keine Kenntnis zur flächenhaften Abbildung der Grundwasserströmung im Kluftgrundwasserleiter des Turoniums und Cenomaniums vor. Aus diesem Grunde wird hilfsweise das hydraulische Gefälle mit dem Einfallwinkel der Schichten des Turoniums und Cenomaniums gleichgesetzt, der im Ruhrgebiet rd. 3 Grad beträgt (KUKUK 1938). Vorsorglich wird mit $1 \text{ Grad} < \alpha_{T+C} < 5 \text{ Grad}$ eine etwas größere Wertespannbreite angesetzt. Aus der Sinusfunktion und dem v. g. Einfallwinkel berechnet sich das hydraulische Gefälle zu $0,02 < i < 0,09$. Aufgrund der dargelegten Unsicherheit werden die Zuflussraten unter Zugrundelegung von drei verschiedenen Annahmen für das hydraulische Gefälle ermittelt ($i_1 = 0,02$; $i_2 = 0,05$; $i_3 = 0,09$; Tabelle 22).

Die Zustrombreite l_{Zustrom} wird entlang der NE-SW-Ausdehnung der umhüllenden Abbaubereiche ermittelt (Anhang 2). Die Mächtigkeiten der Schichten des Turoniums und Cenomaniums entsprechen den Angaben in den Schichtenprofilen der Schächte (Anhang 3). Die Gesamtzuflussrate setzt sich aus den Zuflüssen aus den Schichten des Turoniums und Cenomaniums sowie aus der freien Zusickerung aus der Emscher-Formation zusammen (Gleichung 56).

$$\dot{V}_{\text{Inf,ges}} = \dot{V}_{T+C} + \dot{V}_{\text{EM}} \quad 56$$

mit

\dot{V}_{Inf}	=	Zufluss-, Infiltrationsrate (m³/d),
\dot{V}_{T+C}	=	Zuflussrate aus den Schichten des Turoniums und Cenomaniums in das Grubengebäude (m³/d),
\dot{V}_{EM}	=	Zuflussrate aus den Schichten der Emscher-Formation in das Grubengebäude (m³/d).

Abschnitt 6.4 – Ermittlung der Modelleingangsdaten

Im analytischen Modell wird angenommen, dass sich der Zufluss gleichmäßig auf die gesamte Abbaufäche verteilt. Es handelt sich demnach um eine flächenhafte vertikale Infiltrationsspende, die sich wie folgt errechnet (Abschnitt 4.2.4; Gleichung 57).

$$h_{\text{Inf}} = \frac{\dot{V}_{\text{T+C}} + \dot{V}_{\text{EM}}}{A_{\text{U,Abbau}}} \quad 57$$

Ergänzend zur Legende zur Gleichung 56:

h_{Inf} = flächenspezifische vertikale Infiltrationsspende (m/d),
 $A_{\text{U,Abbau}}$ = Fläche der umhüllenden Abbaufäche (m²).

Die Infiltrationsspenden werden für die unterschiedlich angenommenen Einfallwinkel berechnet (Tabelle 22). Gemäß der Gleichung 57 beträgt die Infiltrationsspende aus dem Hangenden des Bergwerks Westfalen zwischen $3,0 \times 10^{-6}$ m/d und $6,6 \times 10^{-5}$ m/d (für $i_2 = 0,05$: $8,7 \times 10^{-6}$ m/d; Tabelle 22). Für das Bergwerk Königsborn lässt sich eine Infiltrationsspende zwischen $3,5 \times 10^{-6}$ m/d und $9,3 \times 10^{-5}$ m/d orientierend abschätzen (für $i_2 = 0,05$: $1,2 \times 10^{-5}$ m/d; Tabelle 22; gesamte rechnerische Herleitung siehe Anhang 7).

Tabelle 22: Wertespannbreiten der Infiltrationsspenden, die den Bergwerken Westfalen und Königsborn über den Schichten des Turoniums und Cenomaniums zufließen.

	Einheit	Bergwerk Westfalen			Bergwerk Königsborn		
		min	mittel	max	min	mittel	max
Einfallen der Schichten	[°]	1	3	5	1	3	5
	[rad]	1,7E-02	5,2E-02	8,7E-02	1,7E-02	5,2E-02	8,7E-02
Gefälle i	[1]	0,02	0,05	0,09	0,02	0,05	0,09
Zuflussrate über Turonium und Cenomanium	[m³/s]	0,0035	0,0191	0,1754	0,0019	0,0104	0,0951
	[m³/d]	303	1.654	15.154	164	897	8.212
Infiltrationsspende aus Turonium und Cenomanium in das Grubengebäude	[m/d]	1,3E-06	7,0E-06	6,4E-05	1,8E-06	9,9E-06	9,1E-05
Infiltrationsspende aus Emscher-Formation in das Grubengebäude	[m/d]	1,7E-06			1,7E-06		
Gesamt-infiltrationsspende	[m/d]	3,0E-06	8,7E-06	6,6E-05	3,5E-06	1,2E-05	9,3E-05

6.4.4 Bergmännisch geschaffenes Resthohlraumvolumen

Über das flutbare, bergbaulich geschaffene Hohlraumvolumen (im Folgenden als „Resthohlraumvolumen“ bezeichnet) der Bergwerke Westfalen und Königsborn liegen unter-

Abschnitt 6.4 – Ermittlung der Modelleingangsdaten

schiedliche Angaben vor, die sich vor allem bei dem Bergwerk Königsborn stark voneinander unterscheiden (Tabelle 24). Die Angaben für das Bergwerk Westfalen liegen innerhalb einer engeren Wertespannbreite (Tabelle 23). Die Vorgehensweise bei der Herleitung der Werte ist in einigen Fällen nicht in dem Umfang beschrieben, der erforderlich ist, um die Werte verifizieren zu können.

Tabelle 23: Dokumentierte Resthohlraumvolumina des Bergwerks Königsborn nach verschiedenen Autoren und Quellen.

Resthohlraumvolumen, m ³	Bemerkung	Quelle
> 4.000.000	Angabe für das gesamte Untertagebergwerk	RUHRKOHLE BERGBAU AG (1995)
9.170.711	Angabe für das gesamte Untertagebergwerk (ohne Strecken und Schächte)	RAG AG
43.728.465	Aus dem Grubenwasseranstiegsverlauf abgeleitet	KORIES et al. (2017b)

Tabelle 24: Dokumentierte Resthohlraumvolumina des Bergwerks Westfalen nach verschiedenen Autoren und Quellen.

Resthohlraumvolumen, m ³	Bemerkung	Quelle
9.264.939	Angabe für das gesamte Untertagebergwerk (ohne Strecken und Schächte)	RAG AG
9.500.000	Angabe für den Abbaubereich Maximiliangraben	RÜTERKAMP et al. (2000)
9.850.000	Angabe für das gesamte Untertagebergwerk	MARZILGER (2005)

Um die Datengrundlage und Vorgehensweise zu vereinheitlichen, werden die Angaben der RAG AG verwendet (Tabelle 23; Tabelle 24). Diese berücksichtigen die Volumina der abgebauten Flächen, die aus dem Produkt der Abbaufäche und der Flözmächtigkeit ermittelt wird. Zur Bestimmung des verbleibenden Resthohlraumvolumens werden die Volumina entsprechend der Annahme der Senkungsberechnung (Abschnitt 4.3.2) pauschal mit dem Faktor 0,1 (= 10 %) multipliziert (Tabelle 25). Es werden keine teufen- und/

oder versatzabhängige Wichtungsfaktoren für die Berechnung der Resthohlraumvolumina verwendet.

Die Volumina der Schächte und Strecken werden seitens der RAG AG nicht digital erfasst. Um diesen Volumina Rechnung zu tragen, hat es sich in der Praxis bewährt, einen pauschalen Faktor von 10 % zu den Abbauvolumina hinzu zu addieren (Gleichung 58). Dieser Faktor ist anhand bereits erfolgter Teilflutungen in Steinkohlenbergwerken im Ruhrgebiet abgeleitet worden.

$$V_{\text{RHH}} = (V_{\text{Abbau}} \cdot 0,9) + (V_{\text{Abbau}} \times 0,1) = V_{\text{Abbau}} \quad 58$$

mit

V_{RHH} = bergmännisch geschaffenes Resthohlraumvolumen (m³),
 V_{Abbau} = Abbauvolumen (m³),
 ($[V_{\text{Abbau}} \times 0,9]$ = Resthohlraumvolumen der Abbaubereiche,
 $[V_{\text{Abbau}} \times 0,1]$ = Resthohlraumvolumen der Strecken und Schächte).

Für das Bergwerk Ibbenbüren dienen die Angaben zu dem Resthohlraumvolumen aus KORIES et al. (2017a; Tabelle 25). In dieser Aufstellung wird nicht zwischen den Resthohlraumvolumen der Abbaubereiche und den Strecken/Schächten unterschieden.

Tabelle 25: Resthohlraumvolumina der Bergwerke Westfalen, Königsborn und Ibbenbüren (Abbaubereich „Westfeld“; Datenquelle: Bergwerke Westfalen und Königsborn: RAG AG. Bergwerk Ibbenbüren: KORIES et al. 2017a).

Untertage- bergwerk	Abbauvolumen	Resthohlraum- volumen der Abbaufächen	Volumen der Strecken und Schächte	Gesamtrest- hohlraum- volumen
	V_{Abbau}	$V_{\text{RHH,Abbau}}$	$V_{\text{Strecken+Schächte}}$	V_{RHH}
	m ³	m ³	m ³	m ³
Westfalen	10.191.433	9.264.939	926.494	10.191.433
Königsborn	10.087.782	9.170.711	917.071	10.087.782
Ibbenbüren	k. A.	5.536.742	700.000	5.536.742

Um den Unsicherheiten bei der Bestimmung der Resthohlraumvolumina Rechnung zu tragen, werden zu den in den Unterlagen dokumentierten Gesamtresthohlraumvolumina 10 % hinzuaddiert (maximale Annahme) bzw. 10 % abgezogen (minimale Annahme; Tabelle 26). Die Bergwerke Westfalen und Königsborn zeigen mit rd. 9 Mio. m³ bis 11 Mio. m³ vergleichbar große Resthohlraumvolumina. Das Resthohlraumvolumen im Abbaubereich „Westfeld“ des Bergwerks Ibbenbüren beträgt mit rd. 5 Mio. m³ bis 6 Mio. m³ in etwa die Hälfte.

Tabelle 26: Wertespannbreiten der Resthohlraumvolumina der Bergwerke Westfalen, Königsborn und Ibbenbüren (Abbaubereich „Westfeld“).

Untertagebergwerk	Resthohlraumvolumen		
	minimal	dokumentierter	maximal
	($0,9 \cdot dW$)	Wert	($1,1 \cdot dW$)
	$V_{RHV,min}$	V_{RHV}	$V_{RHV,max}$
	m ³	m ³	m ³
Ibbenbüren	4.983.069	5.536.743	6.090.417
Königsborn	9.079.004	10.087.782	11.096.560
Westfalen	9.172.289	10.191.433	11.210.576

Eine teufendifferenzierte Verteilung der Resthohlraumvolumina der Bergwerke Ibbenbüren, Königsborn und Westfalen ist dem Anhang 4 zu entnehmen.

6.4.5 Hydraulisch wirksamer Einflussbereich

Die hydraulischen Verhältnisse werden innerhalb einer räumlich abgrenzbaren Fläche durch die Wasserhaltung beeinflusst. Die Bestimmung der Reichweite dieses hydraulisch wirksamen Einflussbereichs (im Folgenden als „Einflussbereich“ bezeichnet) ist mit vielen Unsicherheiten verbunden, die den Inhomogenitäten des Untergrunds geschuldet sind (Abschnitt 4.3.5). Sämtliche Ergebnisse stellen daher lediglich eine grobe Annäherung an den tatsächlichen Verhältnissen dar.

Der nachfolgende Ansatz beschreibt die Vorgehensweise, die für die Abschätzung der Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs verwendet wird. Die Vorgehensweise basiert auf der Annahme, dass sich diese Fläche aus der horizontalen Projektion der umhüllenden Abbaufäche $A_{U,Abbau}$ und der Reichweite des wasserhaltungsbedingten (degressiv verlaufenden) Absenkungstrichters $A_{Absenkung}$ zusammensetzt (Abbildung 29; Abbildung 30; Gleichung 59). Innerhalb dieser Fläche infiltriert Wasser in das Grubengebäude. Bereiche außerhalb dieser Fläche entwässern hingegen nicht in Richtung des Grubengebäudes und tragen demnach nicht zum Grubenwasseranstieg bei. Diese Vorgehensweise lässt die geologischen und tektonischen Elemente (z. B. Störungen) unberücksichtigt, die weiter entfernt liegende Bereiche hydraulisch miteinbeziehen könnten.

$$A_E = A_{U,Abbau} + A_{Absenkung}$$

59

mit

A_E = Fläche des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs (m²),

$A_{U,Abbau}$ = Fläche der umhüllenden Abbaufäche (m²),

$A_{Absenkung}$ = Fläche des Absenkungstrichters (m²).

Das analytische Modell setzt eine (vereinfachte) rotationssymmetrische Geometrie des Einflussbereichs voraus. Daher wird die mittels Gleichung 59 ermittelte Flächengröße in eine Kreisform mit äquivalenter Flächengröße überführt (Gleichung 60) und daraus die Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs bestimmt (Gleichung 61).

$$A_E = \pi \times l_E^2 = \pi \times (l_{U,Abbau} + l_{Absenkung})^2 \quad 60$$

$$l_E = \sqrt{\frac{A_E}{\pi}} \quad 61$$

mit

A_E = Fläche des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs (m²),

l_E = Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs (m),

$l_{U,Abbau}$ = Reichweite der umhüllenden Abbaufächen (m),

$l_{Absenkung}$ = Reichweite des Absenkungstrichter (m).

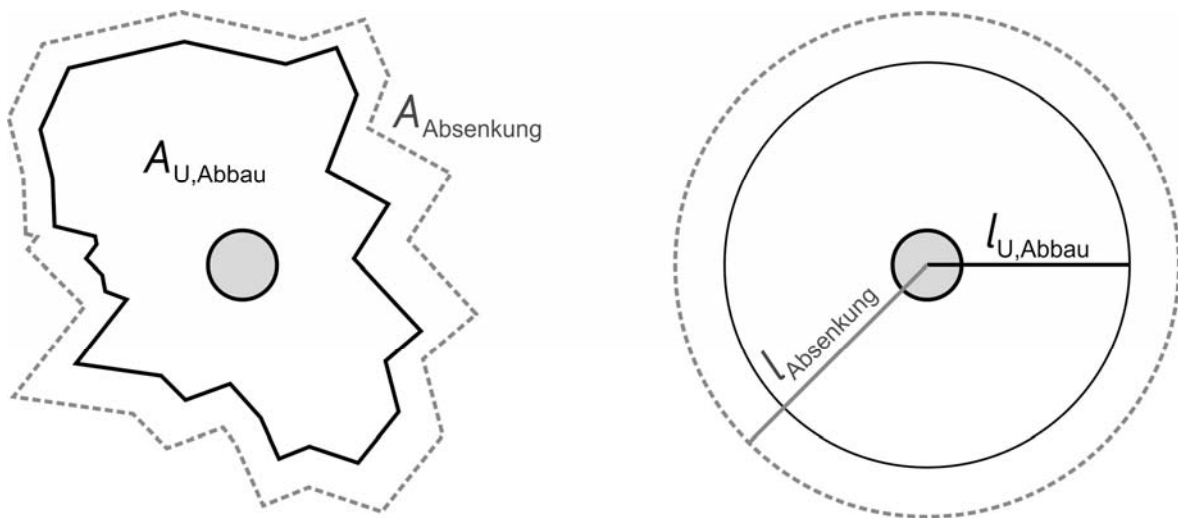


Abbildung 29: Überführung der „tatsächlichen“ Umhüllenden der Abbaufächen (schwarz) und des Absenkungstrichters (grau gepunktet; linke Seite) in eine idealisierte (rotationssymmetrische) Form mit gleicher Flächengröße (rechte Seite).

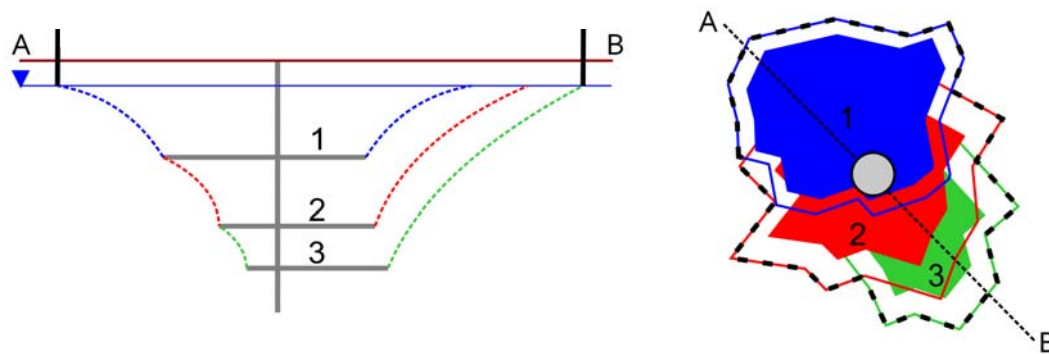


Abbildung 30: Profilschnitt und die daraus resultierende horizontale Projektion vertikal übereinander liegender Abbaubereiche sowie der Absenkungstrichter.

Die Abbaufäche des Bergwerks Ibbenbüren basiert auf Grundlage der Darstellung in BUSCH et al. (2016). Die Flächengröße ist GIS-gestützt ermittelt. Die Abbaufächen für die Bergwerke Königsborn und Westfalen liegen als digitale Polygone vor (Quelle: DMT GmbH & Co. KG [Essen]). Die in den digitalen Polygonen fehlenden Abbaufächen im Nordosten des Bergwerks Westfalen sind anhand der Darstellung in RÜTERKAMP et al. (2000) ergänzt. Die Ausdehnungen der Abbaubereiche sind im Anhang 2 dargestellt.

Die Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs kann mittels verschiedener Verfahren abgeschätzt werden (Abschnitt 4.3.5). Die Ergebnisse zeigen eine hohe Wertespannbreite (Tabelle 27). Das Iterationsverfahren nach KERKIS (1955) für beliebige Einflussreichweiten ergibt den in etwa mittleren Wert aller Verfahren (Gleichung 36; Tabelle 27). Die Reichweitenabschätzung des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs wird daher mittels diesem Verfahren durchgeführt.

Tabelle 27: Vergleich der Ergebnisse der jeweiligen Gleichungen zur Abschätzung der Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs (vergleiche dazu auch Tabelle 13 und Tabelle 14).

Verfahren	Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs, m
SICHARDT (1928; Gleichung 29)	270
KUSSAKIN (1935; Gleichung 30)	1.636
KERKIS (1955; Gleichung 31)	558
KERKIS (1955; Gleichung 32)	1.489
KERKIS (1955; Gleichung 34)	704
KERKIS (1955; Gleichung 36)	1.083
Arithmetischer Mittelwert aller Verfahren	957

Die Eingangsdaten, die für die Herleitung der Reichweite verwendet werden, gehen aus dem Anhang 8 hervor. Vier Iterationen sind in dem vorliegenden Fall erforderlich, um stationäre Reichweiten zu ermitteln. Die Wertespannbreite für die Reichweite des Einflussbereichs wird wie folgt festgelegt (Tabelle 28):

- Die minimale Reichweite ($l_{U,Abbau}$) entspricht dem Radius der umhüllenden Abbaufäche (schwarzer [innerer] Radius; Abbildung 31). Die Reichweite des Absenkungstrichters ($l_{Absenkung}$) bleibt unberücksichtigt.
- Die maximale Reichweite ($l_{E,max}$) entspricht der Summe der Radien der umhüllenden Abbaufäche sowie des Absenkungstrichters, der nach KERKIS (1955) am Ende des Iterationsvorganges ermittelt wird ($l_{Absenkung} = l_{E,4}$; Gleichung 60; Gleichung 61; grau gepunkteter [äußerer] Radius; Abbildung 31).
- Die mittlere (zu erwartende) Reichweite der Einflussbereichs ($l_{E,erwartet}$) entspricht der Summe des Radius der umhüllenden Abbaufäche sowie des halben Radius des Absenkungstrichters ($l_{Absenkung}/2 = l_{E,4}/2$; grau gestrichelter [mittlerer] Radius; Abbildung 31).

$$l_{E,erwartet} = l_{U,Abbau} + \frac{l_{Absenkung}}{2}$$

62

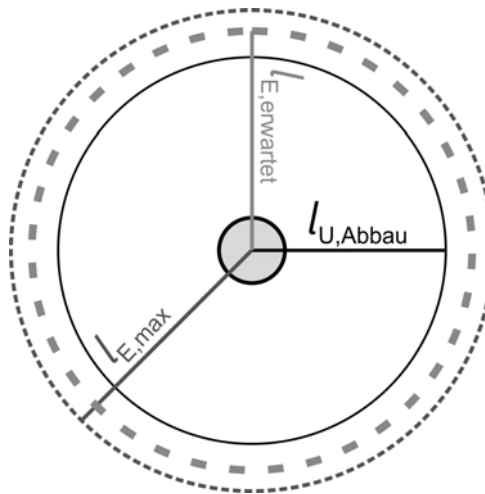


Abbildung 31: Ansätze für die Reichweiten des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs (schwarz: minimale Reichweite; grau gestrichelt: mittlere [zu erwartende] Reichweite; grau gepunktet: maximale Reichweite).

Die geringste Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs ist mit rd. 3.000 m dem Bergwerk Ibbenbüren zuzuordnen, welches mit Werten zwischen 2.313 m und 3.689 m auch die geringste Wertespannbreite aller untersuchten Untertagebergwerke aufweist (Tabelle 28). Beim Bergwerk Königsborn werden im Zuge eines Grubenwasseranstiegs eine rechnerisch zu erwartende Fläche mit einer (radialen) Reichweite von rd. 5.400 m hydraulisch aktiviert. Die Wertespannbreite ist größer als beim Bergwerk Ibben-

Abschnitt 6.5 – Vorgehensweise bei der Modellierung

büren (zwischen 1.874 m und 8.841 m; Tabelle 28). Die größte Reichweite hat das Bergwerk Westfalen: die Werte schwanken zwischen 2.255 m und 15.125 m bei einer rechnerisch zu erwartenden Reichweite von rd. 8.700 m (Tabelle 28).

Tabelle 28: Wertespannbreiten der Reichweiten des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs der Bergwerke Ibbenbüren (Abbaubereich „Westfeld“), Königsborn und Westfalen.

Untertagebergwerk	Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs		
	minimal	mittlerer Wert	maximal
	$l_{U,Abbau}$	$l_{E,erwartet}$	$l_{E,max}$
	m	m	m
Ibbenbüren	2.313	3.001	3.689
Königsborn	1.874	5.357	8.841
Westfalen	2.255	8.690	15.125

Die Ergebnisse zeigen, dass die rechnerisch zu erwartende Reichweite mit der Deckgebirgsmächtigkeit zunimmt (Tabelle 28). Bei Untertagebergwerken mit hohen Mächtigkeiten nimmt zudem die Wertespannbreite zwischen dem minimalen und maximalen Ansatz zu. Diese Tatsache belegt, mit welchen Unsicherheiten die Abschätzung dieser Reichweite verbunden ist.

6.5 Vorgehensweise bei der Modellierung

Für die Modellierung wird ein Code auf Basis analytischer Methoden der Grundwasserdynamik verwendet, der mit der Software Delphi geschrieben wurde. Diese basiert auf der Programmiersprache Object Pascal, die eine Weiterentwicklung der Programmiersprache Pascal ist. Vergleichbar mit Visual Basic von Microsoft, erfolgt auch mit Delphi eine visuelle bzw. objektorientierte Programmierung (Abbildung 32).

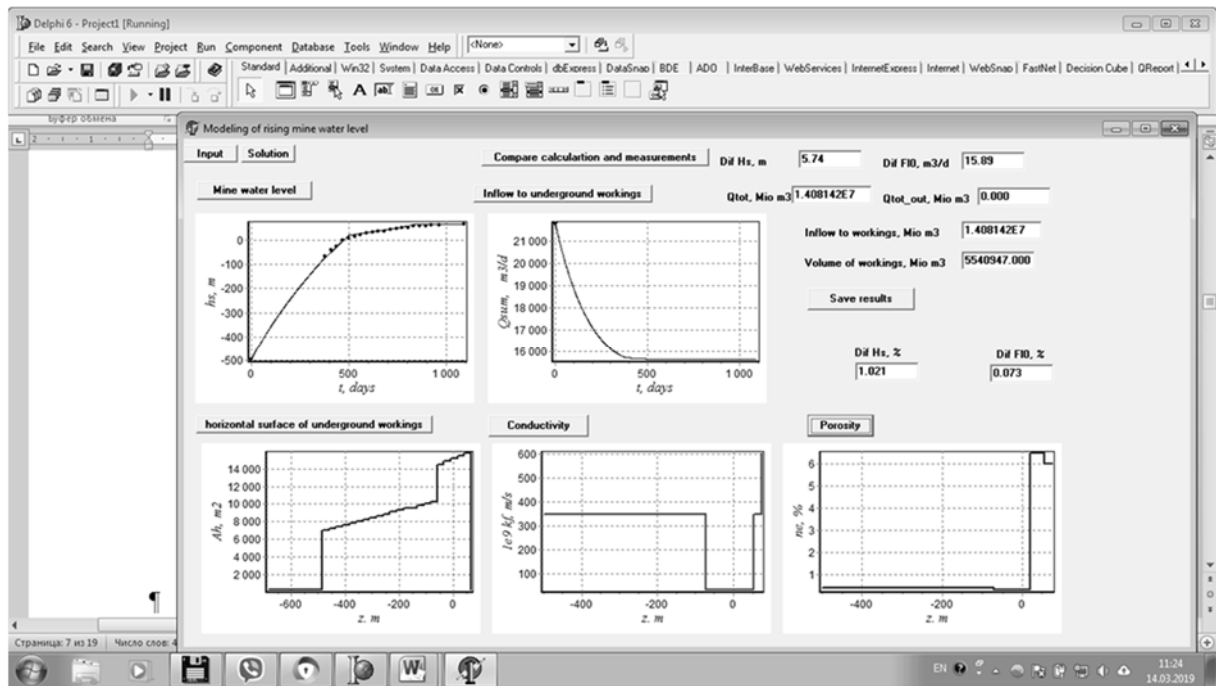


Abbildung 32: Visualisierung der Eingabeparameter (Ausschnitt aus Delphi).

Die Vorgehensweise und Anwendung des analytischen Modells lässt sich grundsätzlich in die drei nachfolgend genannten Schritte gliedern:

- Erstellung des Codes, mit Hilfe dessen die zeitliche Entwicklung der Grubenwasser(druck)fläche und der Zuflussrate in ein Untertagebergwerk im Zuge eines Grubenwasseranstiegs modelliert werden kann. In dieser Arbeit wird nicht weiter auf die Erstellung des Codes eingegangen.
- Festlegung der Modelleingangsdaten (Faktoren; Abschnitt 6.4) und Kalibrierung des analytischen Modells (weitere Ausführungen dazu siehe weiter unten).
- Variantenrechnungen zur Ermittlung der Modellsensitivität auf die Variation der Modelleingangsdaten (Faktoren; Abschnitt 7.1). Die absoluten und relativen Abweichungen zwischen den Zeitreihen der modellierten und tatsächlich gemessenen Werten werden für jede Variante ermittelt (Gleichung 1 bis Gleichung 4; Abschnitt 2.4.1).

Die Modellierung des Grubenwasseranstiegs mittels des analytischen Modells setzt die Kenntnis über die hydrogeologischen und bergbaulichen Eigenschaften des Untergrunds sowie über zeitabhängige Faktoren voraus (Anhang 9).

Vor der Nutzung ist das analytische Modell zu kalibrieren. Bei der Modellkalibrierung werden die Modelleingangsdaten (Faktoren) iterativ variiert, bis die resultierende Modellkurve eine hohe Deckungsgleichheit mit der tatsächlichen Messkurve aufweist. Die Modelleingangsdaten (Faktoren) werden innerhalb der festgelegten Wertespannbreiten variiert, die sich aufgrund der Unsicherheiten hinsichtlich der Wertegenauigkeit ergeben.

Das analytische Modell gilt als ausreichend kalibriert, sobald die Abweichung zwischen den Zeitreihen der tatsächlichen Mess- und der Modellkurve minimal ist ($< 1\%$). Die Modellvariante mit der minimalen Abweichung dient als (optimale) Basisvariante zur Bewertung der Sensitivität des analytischen Modells. Dazu werden die Abweichungen der Modellkurven je Variante zu dieser Basisvariante ermittelt (Abschnitt 7.1). Die dieser Variante zugrundeliegenden Faktoren werden „modellgestützt ermittelte optimale Werte“ (im Folgenden als „optimaler Wert“ bzw. „oW“ bezeichnet) genannt.

6.6 Variantenrechnung

Die statistische Versuchsplanung setzt die Festlegung einer zu untersuchenden Wertespannbreite voraus. Ausgehend von den optimalen Werten der Basisvariante (Abschnitt 6.5) wird eine untere (–) und obere Stufe (+) eines Faktors entsprechend einer prozentualen Abweichung gewählt. Der Abstand zwischen den Stufen der jeweiligen Faktoren muss so gewählt werden, dass die Wertespannbreite einerseits nicht zu klein ist, so dass der resultierende Effekt möglicherweise nur gering ausgeprägt ist. Andererseits darf die Wertespannbreite nicht zu groß sein, so dass der resultierende Effekt möglicherweise zu stark ausgeprägt ist.

In der Abbildung 33 ist am Beispiel des Bergwerks Ibbenbüren die Veränderung der relativen Abweichung zwischen den Zeitreihen der berechneten und gemessenen Grubenwasser(druck)fläche dargestellt, die sich in Abhängigkeit von der Höhe der Faktorenvariation (d. h. Abweichung vom optimalen Wert) ergibt. Die Schnittstelle der Ordinate mit der Abszisse (0; A_{V-BV}) stellt die (geringste) Abweichung der optimalen Basisvariante dar. Mit zunehmender Abweichung des untersuchten Faktors vom Wert der optimalen Variante nimmt die relative Abweichung der berechneten Grubenwasser(druck)fläche annähernd linear zu. Die Entwicklungen sind im positiven und negativen Bereich nahezu identisch.

Ein Grundsatz der Modellierung lautet, dass das Modellergebnis immer nur so gut ist wie die verwendeten Modelleingangsdaten. Modelleingangsdaten, die deutlich von dem tatsächlichen („richtigen“) Wert abweichen, können dazu führen, dass das Modellergebnis nicht realistisch ist. Aus diesem Grunde werden in der vorliegenden Untersuchung daher für jeden Faktor ein Vertrauensbereich von $\pm 10\%$ um den optimalen Wert gewählt. Diese Wertespannbreite weicht demnach nicht stark von den optimalen Werten ab, deckt aber zugleich einen ausreichend großen Vertrauensbereich ab. Die einheitliche Wertespannbreite für jeden Faktor sowie für jedes Untertagebergwerk erlaubt die Vergleichbarkeit der Modellergebnisse untereinander.

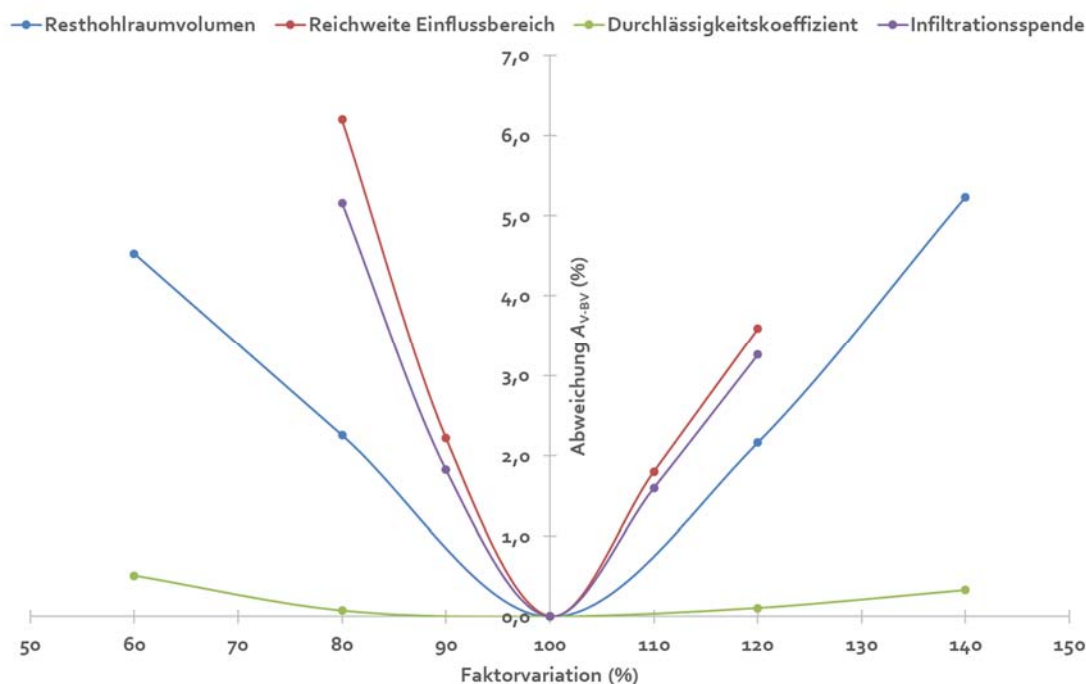


Abbildung 33: Abhängigkeit der relativen Abweichung zwischen den Zeitreihen der berechneten und gemessenen Grubenwasser(druck)fläche von der Höhe der Faktorvariation am Beispiel des Bergwerks Ibbenbüren (Abbaubereich „Westfeld“).

Die recherchierten bzw. rechnerisch ermittelten Wertespannbreiten sind für jedes Untertagebergwerk in der Tabelle 29 bis Tabelle 31 zusammengefasst. Sämtliche modelltechnisch untersuchten Werte (untere und obere Stufe) liegen innerhalb dieser Wertespannbreiten. Lediglich die Infiltrationsspende, die im analytischen Modell des Bergwerks Königsborn verwendet wird, überschreitet geringfügig den berechneten maximalen Wert (Tabelle 30).

Tabelle 29: Recherchierte bzw. rechnerisch ermittelte Wertespannbreiten (minimaler und maximaler Wert) sowie modelltechnisch untersuchte Spannweite (untere und obere Stufe) der Faktoren für das Bergwerk Ibbenbüren (Abbaubereich „Westfeld“).

Faktor	minimaler Wert	Erwartungswert	untere Stufe (–)	optimaler Wert (o)	obere Stufe (+)	maximaler Wert
Resthohlraumvolumen, m ³	4.983.069	5.536.743	4.983.069	5.536.743	6.090.417	6.090.417
Einflussbereich, m	2.313	3.001	2.520	2.800	3.080	3.689
Durchlässigkeitskoeffizient, m/s	$3,3 \times 10^{-10}$	$6,7 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-9}$	$1,3 \times 10^{-9}$	$1,4 \times 10^{-9}$	$1,3 \times 10^{-7}$
Infiltrationsspende, m/d	$2,0 \times 10^{-4}$	$3,6 \times 10^{-4}$	$5,7 \times 10^{-4}$	$6,4 \times 10^{-4}$	$7,0 \times 10^{-4}$	$7,1 \times 10^{-4}$

Tabelle 30: Recherchierte bzw. rechnerisch ermittelte Wertespannbreiten (minimaler und maximaler Wert) sowie modelltechnisch untersuchte Spannbreite (untere und obere Stufe) der Faktoren für das Bergwerk Königsborn.

Faktor	minimaler Wert	Erwartungswert	untere Stufe (-)	optimaler Wert (o)	obere Stufe (+)	maximaler Wert
Resthohlraumvolumen, m ³	9.079.004	10.087.782	9.079.004	10.087.782	11.096.560	11.096.560
Einflussbereich, m	1.874	5.357	2.700	3.000	3.300	8.841
Durchlässigkeitskoeffizient, m/s	$1,6 \times 10^{-8}$	$3,0 \times 10^{-8}$	$7,5 \times 10^{-8}$	$8,3 \times 10^{-8}$	$9,2 \times 10^{-8}$	$3,3 \times 10^{-7}$
Infiltrationsspende, m/d	$3,5 \times 10^{-6}$	$1,2 \times 10^{-5}$	$1,3 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-4}$	$1,5 \times 10^{-4}$	$9,3 \times 10^{-5}$

Tabelle 31: Recherchierte bzw. rechnerisch ermittelte Wertespannbreiten (minimaler und maximaler Wert) sowie modelltechnisch untersuchte Spannbreite (untere und obere Stufe) der Faktoren für das Bergwerk Westfalen.

Faktor	minimaler Wert	Erwartungswert	untere Stufe (-)	optimaler Wert (o)	obere Stufe (+)	maximaler Wert
Resthohlraumvolumen, m ³	9.172.289	10.191.433	9.172.289	10.191.433	11.210.576	11.210.576
Einflussbereich, m	2.255	8.690	5.130	5.700	6.270	15.125
Durchlässigkeitskoeffizient, m/s	$2,8 \times 10^{-8}$	$5,1 \times 10^{-8}$	$4,2 \times 10^{-8}$	$4,7 \times 10^{-8}$	$5,1 \times 10^{-8}$	$3,4 \times 10^{-7}$
Infiltrationsspende, m/d	$3,0 \times 10^{-6}$	$8,7 \times 10^{-6}$	$7,2 \times 10^{-6}$	$8,0 \times 10^{-6}$	$8,8 \times 10^{-6}$	$6,6 \times 10^{-5}$

Die faktor- und termspezifischen Wirkstärken werden mittels eines vollständigen vollfaktoriellen Versuchsplans mit zwei Stufen bestimmt (Anhang 10). Dieser Versuchsplan wird von der verwendeten Statistiksoftware auf Grundlage der Anzahl der Faktoren und Effekte sowie der gewählten experimentellen Zielsetzung empfohlen. Der Versuchsaufwand bei $N_F = 2$ und $N_X = 4$ umfasst 16 Varianten. Diese decken sämtliche mögliche Faktorkombinationen ab (Varianten V1 bis V16; Anhang 10). Der Wiederholungsversuch setzt den jeweiligen optimalen Wert (o) für jeden Faktor an (Variante V17; Anhang 10). Mit diesem Versuchsplan wird eine lineare Beziehung zwischen den Faktoren und der Ausgangsvariablen untersucht.

Wird die Beziehung durch eine lineare Beziehung nur unzureichend beschrieben, werden zur Bewertung von wechselseitig wirkenden Faktoren oder nicht-linearen (z. B. quadratischen) Beziehungen zwischen Faktoren werden acht weitere Varianten ergänzt (Varianten V18 bis V25; Anhang 10). In diesen Varianten werden lediglich jeweils ein Faktor variiert

Abschnitt 6.6 – Variantenrechnung

(jeweils untere [–] und obere [+] Stufe), während der optimale Wert (o) für die drei anderen Faktoren genutzt wird. In Summe ergeben sich folglich 25 Varianten je Untertagebergwerk (Anhang 10).

Andere Versuchspläne werden im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht.

7 Ergebnisse

7.1 Modellierung

Das Ergebnis der Modellierung sind Datenreihen mit der zeitlichen Entwicklung der Grubenwasser(druck)fläche und der Zuflussrate von Grund- und Grubenwasser in das Grubengebäude. Diese Datenreihen werden grafisch als Kurvenscharen dargestellt (Anhang 14). Die absoluten und relativen Abweichungen zwischen den Zeitreihen der berechneten und gemessenen Daten werden gemäß der Gleichung 2 und Gleichung 4 berechnet (Abschnitt 2.4.1). Je geringer der Wert der Abweichung ist, desto exakter entspricht die jeweilige berechnete Modellkurve der tatsächlichen Messkurve.

Die Datenreihen der Grubenwasser(druck)fläche beruhen auf mehrere Einzelmessungen, die der Zuflussrate lediglich auf eine Messung vor Beginn des Grubenwasseranstiegs (Tabelle 32). Die Zuflussrate am Ende des Grubenwasseranstiegs wird hingegen nur geschätzt, da diese messtechnisch nicht erfasst werden kann.

Tabelle 32: Anzahl N_w der Messungen der Grubenwasser(druck)fläche und der Zuflussrate je Untertagebergwerk.

	Anzahl N_w der Messungen der Grubenwasser- (druck)fläche	Anzahl N_w der Messungen der Zuflussrate
Bergwerk Ibbenbüren (Wilhelm-Schacht)	22	1
Bergwerk Königsborn (Schacht Königsborn 4)	136	1
Bergwerk Westfalen (Schacht Westfalen 7)	91	1

7.1.1 Bergwerk Ibbenbüren

Basisvariante

Die Basisvariante weist eine relative Abweichung von 1,0 % zwischen der berechneten und gemessenen Zeitreihe der Grubenwasser(druck)fläche und 0,1 % zwischen der berechneten und gemessenen Zeitreihe der Zuflussrate auf (Anhang 11). Die Basisvariante repräsentiert demnach die Messkurve mit einer hohen Genauigkeit.

Abweichungen der berechneten Grubenwasser(druck)fläche

Die Varianten zur Modellierung der Grubenwasser(druck)fläche zeigen für das Bergwerk Ibbenbüren eine sehr gute Übereinstimmung mit der Basisvariante (Abbildung 34; Anhang 14). Die relativen Abweichungen liegen nahe beieinander (Abbildung 35; Anhang 11). Die mittlere relative Abweichung aller Varianten beträgt 3,1 %.

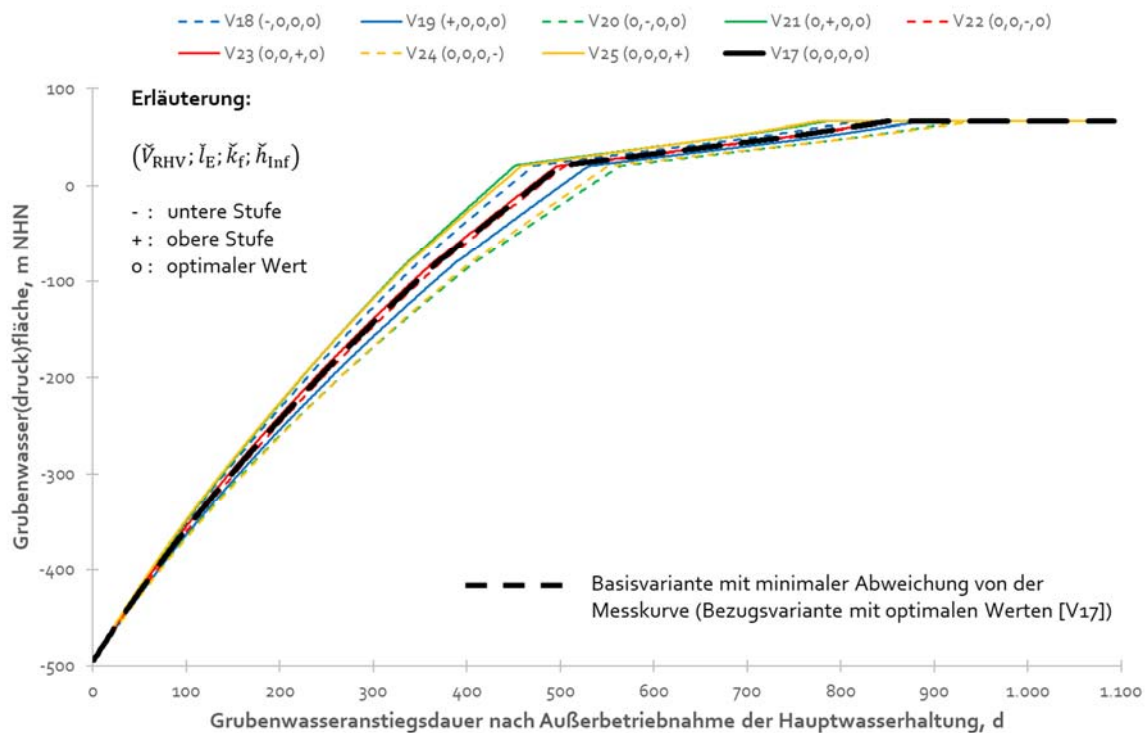


Abbildung 34: Modellkurven der Grubenwasser(druck)fläche für das Bergwerk Ibbenbüren (Abbaubereich „Westfeld“).

Werden die jeweiligen maximalen Werte der Faktoren „Reichweite des Einflussbereichs“ und „Infiltrationsspende“ verwendet, so weicht die resultierende Modellkurve – gegenüber der Basisvariante – nach oben ab (Abbildung 34; Anhang 14). Das bedeutet, dass das Grubenwasser schneller ansteigt, was durch den erhöhten Zufluss aus dem Hangenden begründet ist. Wird hingegen der maximale Wert für den Faktor „Resthohlraumvolumen“ angesetzt, so flacht folglich die Grubenwasseranstiegskurve ab, da für dieselbe Zuflussrate ein erhöhtes flutbares Hohlraumvolumen zur Verfügung steht (Abbildung 34; Anhang 14).

Die Variation des Faktors „Durchlässigkeitskoeffizienten“ bewirkt die minimale relative Abweichung von 1,0 % (Varianten V22_IB und V23_IB), welche jener relativen Abweichung der Basisvariante entspricht (Variante V17_IB; relative Abweichung: 1,0 %). Die singuläre Variation der anderen Faktoren ergeben relative Abweichungen zwischen 1,8 % (Faktor „Resthohlraumvolumen“) und 3,0 % (Faktor „Reichweite des Einflussbereichs“; Abbildung 34; Abbildung 35; Anhang 11; Anhang 14). Die maximale relative Abweichung von

8,7 % verursacht der maximale Wert für den Faktor „Resthohlraumvolumen“, während für die anderen Faktoren die jeweiligen minimalen Werte angesetzt werden (Variante V2_IB; Anhang 11).

Abweichungen der berechneten Zuflussrate

Die durch Variation der Faktoren hervorgerufene relative Abweichung ist bei der Zuflussrate größer als bei der Abweichung der Grubenwasser(druck)fläche (Abbildung 35). Die mittlere relative Abweichung aller Varianten beträgt 10,6 % und übersteigt jener mittleren Abweichung der berechneten Grubenwasser(druck)fläche um das Dreifache.

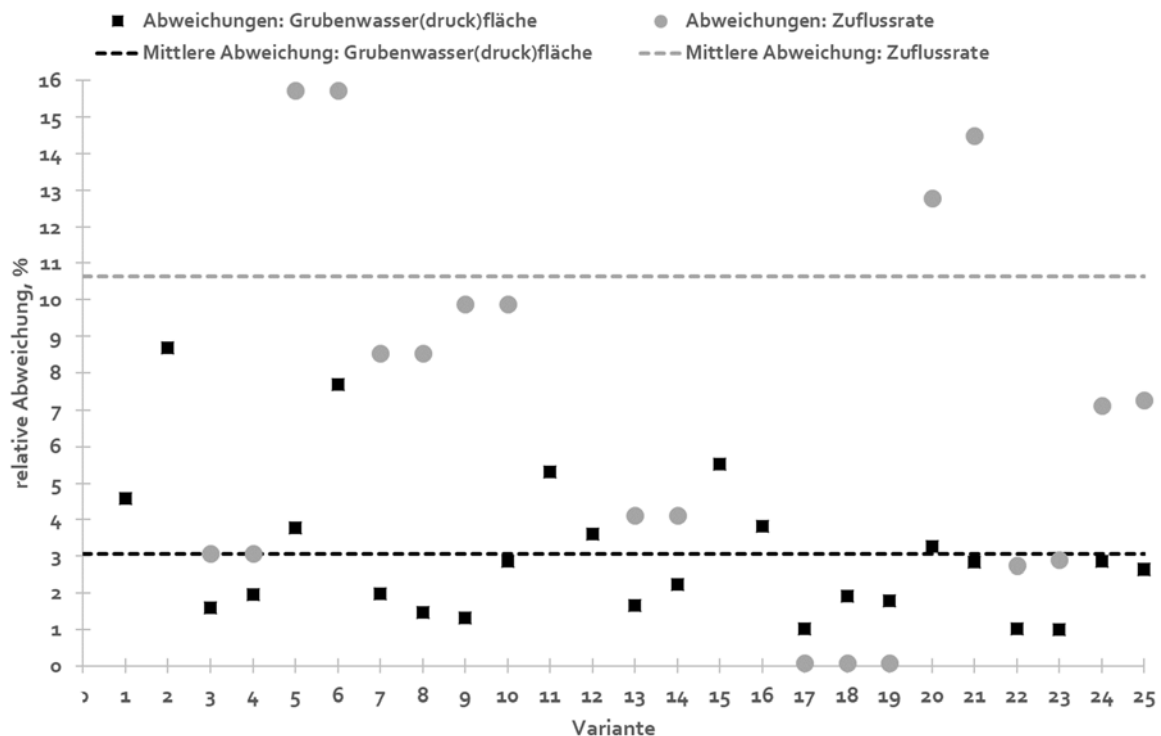


Abbildung 35: Verteilung der relativen Abweichungen zwischen den Zeitreihen der berechneten und gemessenen Grubenwasser(druck)fläche und der Zuflussrate für das Bergwerk Ibbenbüren (Abbaubereich „Westfeld“).

Die Variation des Faktors „Resthohlraumvolumen“ bewirkt nahezu keine Abweichung von der Messkurve (Varianten V18_IB und V19_IB; relative Abweichung: 0,1 %; Anhang 11). Die Modellkurve dieser Varianten entsprechen jener der Basisvariante (Variante V17_IB). Ebenfalls führt die Variation des Faktors „Durchlässigkeitskoeffizient“ nur zu geringen Veränderungen (Variante V22_IB: 2,7 % und Variante V23_IB: 2,9 %; Abbildung 35; Anhang 11). Wird hingegen der Faktor „Reichweite des Einflussbereichs“ singulär variiert, so weichen die Modellkurven im Mittel um 13,7 % von der Messkurve ab (Variante V20_IB: 12,8 %; Variante V20_IB: 14,5 %; Abbildung 35; Anhang 11). Die Kombination der jeweili-

gen maximalen Werte der Faktoren „Reichweite des Einflussbereichs“, „Durchlässigkeitskoeffizient“ und „Infiltrationsspende“ führt hingegen zu der höchsten relativen Abweichung (Varianten V15_IB und V16_IB; relative Abweichungen: je 26,0 %).

7.1.2 Bergwerk Königsborn

Basisvariante

Die Basisvariante weist eine relative Abweichung von 1,2 % zwischen der berechneten und gemessenen Zeitreihe der Grubenwasser(druck)fläche und 0,1 % zwischen der berechneten und gemessenen Zeitreihe der Zuflussrate auf (Anhang 11). Die Basisvariante repräsentiert demnach die Messkurve mit einer hohen Genauigkeit.

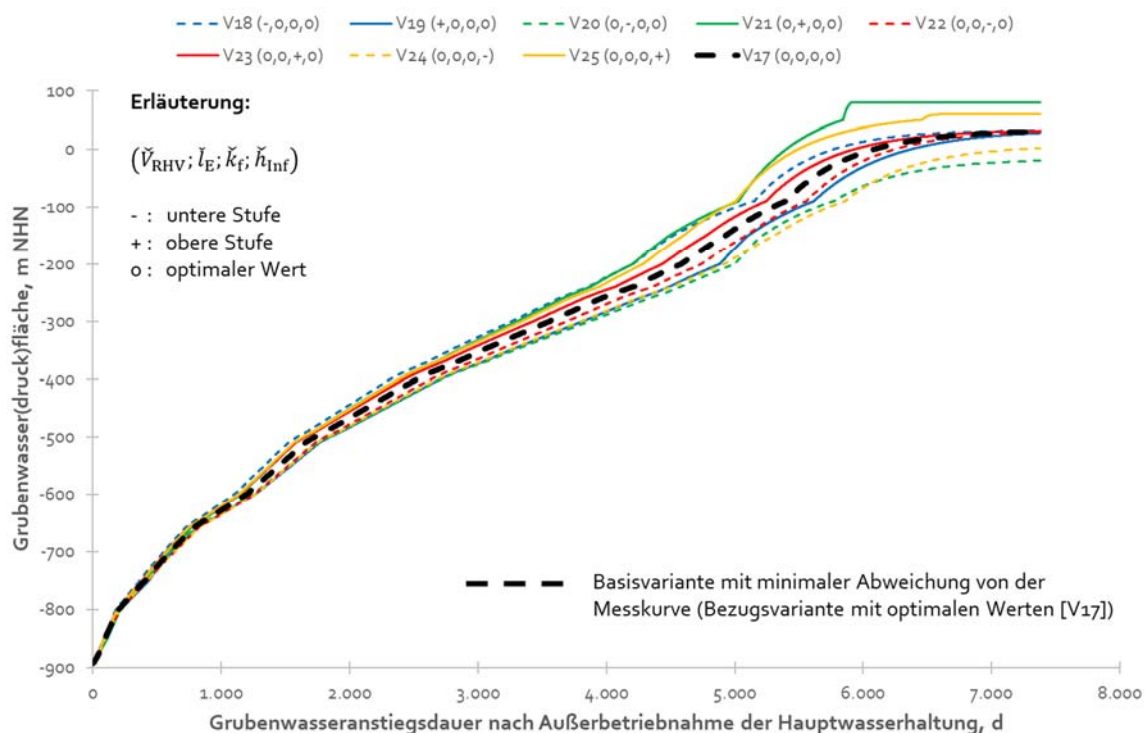


Abbildung 36: Modellkurven der Grubenwasser(druck)fläche für das Bergwerk Königsborn.

Abweichungen der berechneten Grubenwasser(druck)fläche

Die Ergebnisse der Variantenrechnung für das Bergwerk Königsborn zeigen ein vergleichbares Bild wie jene für das Bergwerk Ibbenbüren (Abschnitt 7.1.1; Anhang 11). Der Anstieg der Grubenwasser(druck)fläche im Grubengebäude wird durch alle Varianten gut nachgezeichnet. Die Spannbereite der relativen Abweichungen sowie die mittlere relative Abweichung über alle Varianten (5,1 %) sind nur unwesentlich größer als beim Bergwerk Ibbenbüren. Sobald die Basis des Deckgebirges erreicht wird, vergrößern sich die Abweichungen (Abbildung 36).

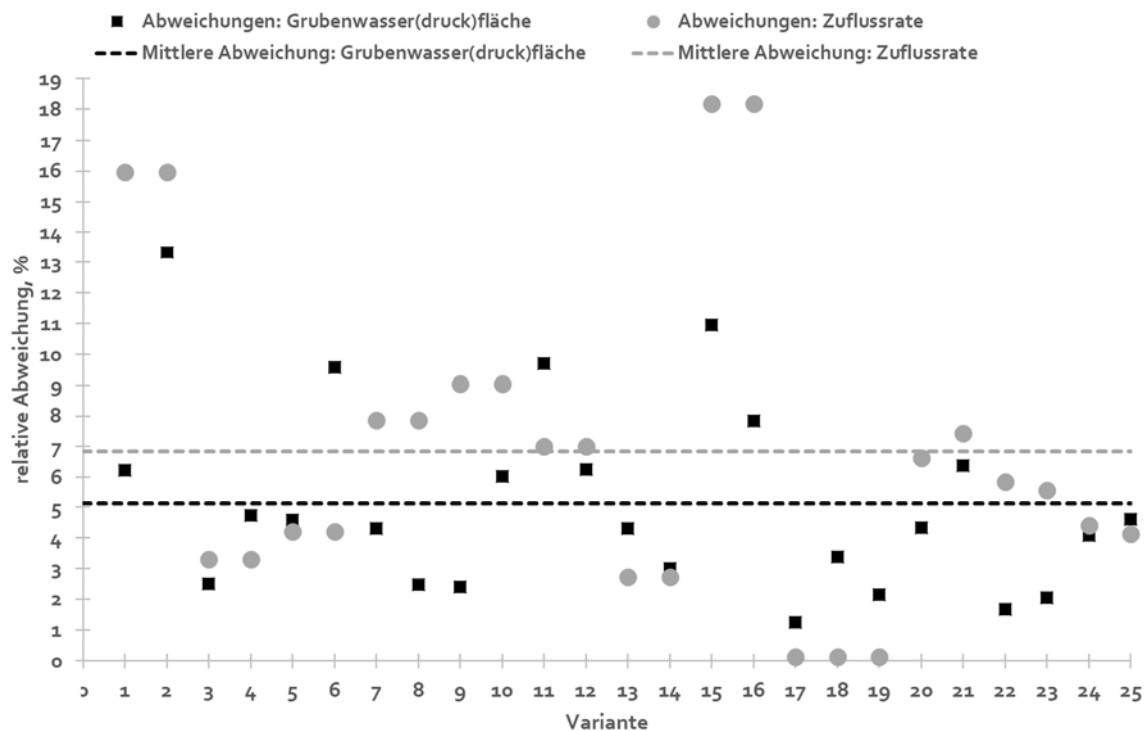


Abbildung 37: Verteilung der relativen Abweichungen zwischen den Zeitreihen der berechneten und gemessenen Grubenwasser(druck)fläche und der Zuflussrate für das Bergwerk Königsborn.

Während die Variation des Faktors „Durchlässigkeitskoeffizient“ im Mittel mit 1,9 % (Variante V22_KB: 1,7 %; Variante V23_KB: 2,1 %; Abbildung 37; Anhang 11) nur geringe Abweichungen verursacht, führen die Variationen der anderen Faktoren zu höheren relativen Abweichungen. Die höchste Abweichung durch die singuläre Variation bewirkt der Faktor „Reichweite des Einflussbereichs“ (Variante V20_KB: 4,3 % Variante V21_KB: 6,4 %; Abbildung 37; Anhang 11). Die (mittleren) relativen Abweichungen, die durch die Variation der anderen beiden Faktoren bewirkt werden, sind vergleichbar (Faktor „Reichweite des Einflussbereichs“: 5,4 % [Varianten V20_KB und V21_KB]; Faktor „Infiltrationsspende“: 4,3 % [Varianten V24_KB und V25_KB]; Abbildung 37; Anhang 11). Die maximale relative Abweichung ergibt sich, wenn der Wert des Faktors „Resthohlraumvolumen“ maximiert und die der übrigen minimiert werden (Variante V2_KB; relative Abweichung: 13,3 %; Abbildung 36; Abbildung 37; Anhang 11).

Abweichungen der berechneten Zuflussrate

Die Variation des Faktors „Resthohlraumvolumen“ spiegelt sich nicht in den berechneten Modellkurven der Zuflussraten wider (Varianten V18_KB und V19_KB; relative Abweichungen: je 0,1 %; Abbildung 37; Anhang 11). Die Verläufe dieser Modellkurven entsprechen jener der Basisvariante. Die singulären Variationen der übrigen Faktoren verursachen mit 4,3 % (Faktor „Infiltrationsspende“) bis 7,0 % (Faktor „Reichweite des Einflussbereichs“) ähnliche Abweichungen. Werden hingegen – wie für das Bergwerk Ibbenbüren –

die Kombination der jeweiligen maximalen Werte der Faktoren „Reichweite des Einflussbereichs“, „Durchlässigkeitskoeffizient“ und „Infiltrationsspende“ verwendet, so sind die relativen Abweichungen maximal (Varianten V15_KB und V16_KB; relative Abweichungen: je 18,2 %). Die über alle Varianten gemittelte relative Abweichung ist mit 6,8 % mit jener mittleren relativen Abweichung der Grubenwasser(druck)fläche (5,1 %) vergleichbar (Abbildung 37). Dieser Mittelwert sowie die Spannbreite der relativen Abweichungen sind jeweils geringer als beim Bergwerk Ibbenbüren.

7.1.3 Bergwerk Westfalen

Basisvariante

Die Basisvariante weist eine relative Abweichung von 2,1 % zwischen der berechneten und gemessenen Zeitreihe der Grubenwasser(druck)fläche und 0,8 % zwischen der berechneten und gemessenen Zeitreihe der Zuflussrate auf (Abbildung 38; Anhang 11; Anhang 14). Die relativen Abweichungen dieser Basisvariante sind im Vergleich zu der der Bergwerke Ibbenbüren und Königsborn geringfügig höher. Allerdings ist auch dieser Basisvariante eine geeignete Repräsentativität für die Messkurve zu attestieren.

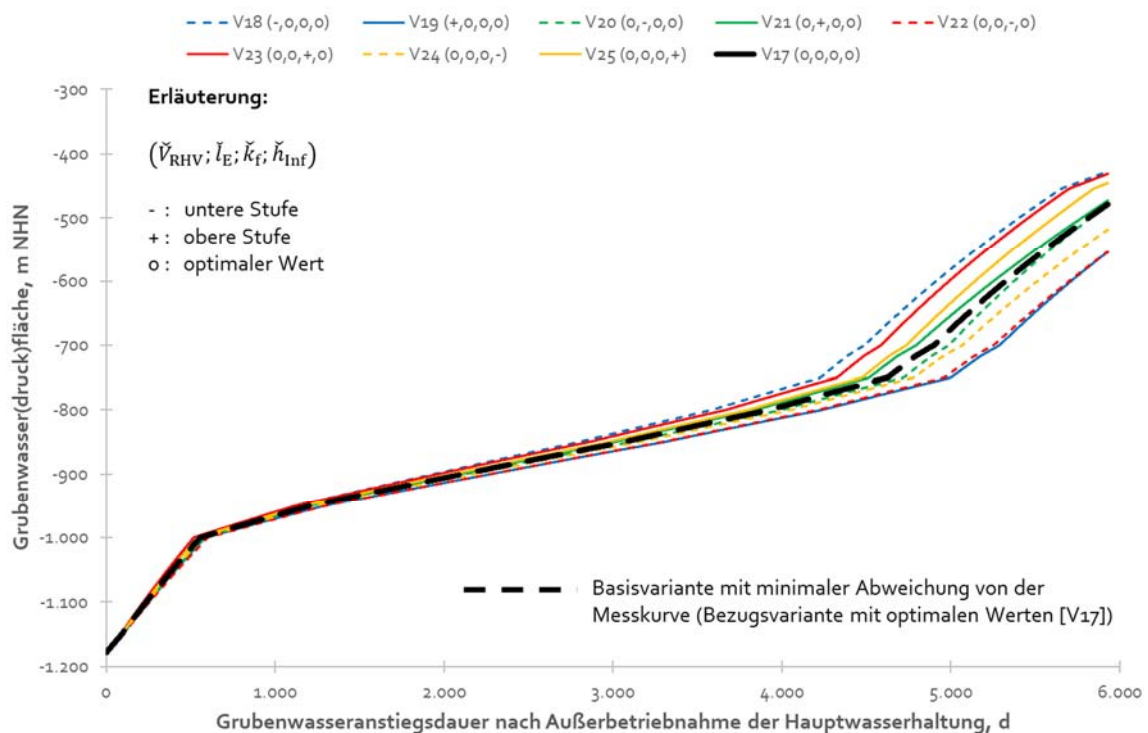


Abbildung 38: Modellkurven der Grubenwasser(druck)fläche für das Bergwerk Westfalen.

Abweichungen der berechneten Grubenwasser(druck)fläche

Die Variationen der Faktoren bewirken dieselben Veränderungen auf den Verlauf der Modellkurven wie bei den anderen beiden betrachteten Untertagebergwerken (Abschnitt 7.1.1; Abschnitt 7.1.2). Wie bei den Modellkurven des Bergwerks Königsborn (Abbildung 36) weichen die Modellkurven auch in diesem Fall deutlicher von der Messkurve ab, sobald die Grubenwasser(druck)fläche die Basis des (sehr) schwach durchlässigen Deckgebirges erreicht (Abbildung 38).

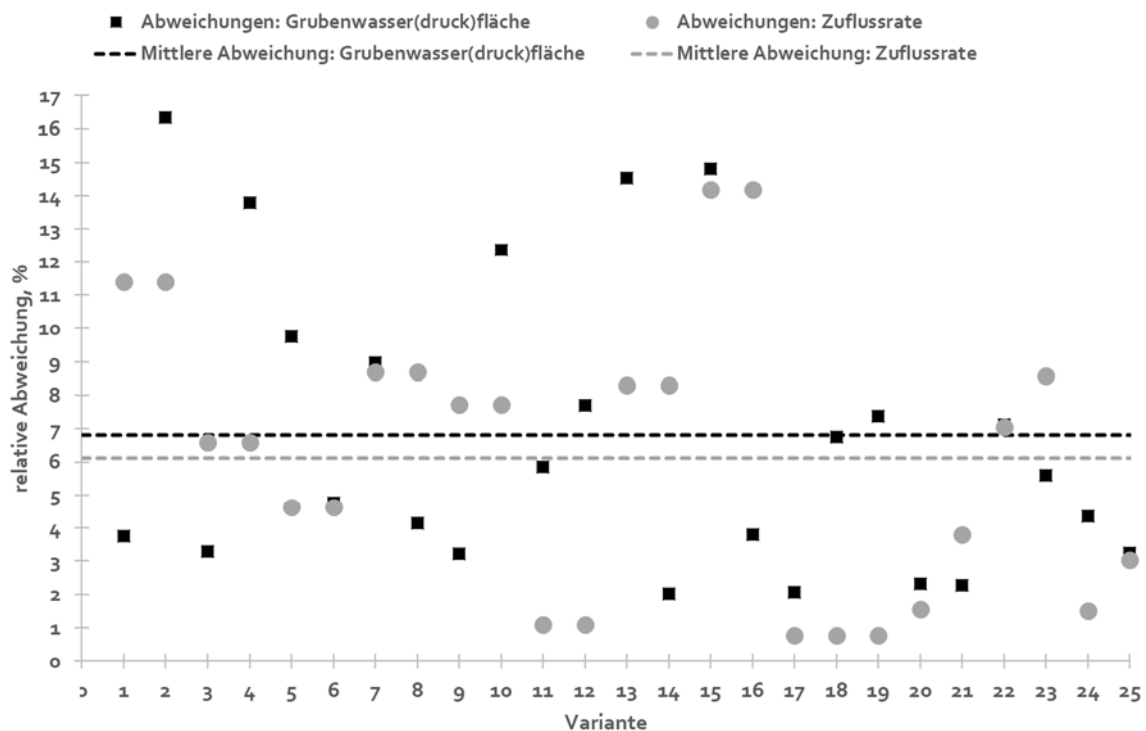


Abbildung 39: Verteilung der relativen Abweichungen zwischen den Zeitreihen der berechneten und gemessenen Grubenwasser(druck)fläche und der Zuflussrate für das Bergwerk Westfalen.

Die Ergebnisse der Variantenrechnung weisen für das Bergwerk Westfalen die höchste Wertespannbreite in den relativen Abweichungen auf (Anhang 11). Diese schwanken zwischen 2,0 % (Variante V14_WF) und 16,3 % (Variante V2_WF; Abbildung 38; Abbildung 39; Anhang 11). Die minimale relative Abweichung, die mit jener der Basisvariante vergleichbar ist, ergibt sich bei der Kombination der jeweiligen maximalen Werte für die Faktoren „Resthohlraumvolumen“, „Durchlässigkeitskoeffizient“ und „Infiltrationsspende“, während für den Faktor „Reichweite des Einflussbereichs“ der minimale Wert angesetzt wird (Variante V14_WF: 2,0 %). Die resultierende Abweichung unterschreitet geringfügig die Abweichungen, die durch die Variation des Faktors „Reichweite des Einflussbereichs“ erwirkt wird (Variante V20_WF und Variante V21_WF: je 2,3; Abbildung 39; Anhang 11). Die höchste relative Abweichung durch die singuläre Variation belegt der Faktor „Resthohl-

raumvolumen" (Variante V18_WF: 6,8 %; Variante V19_WF: 7,4 %; Abbildung 39; Anhang 11). Die maximale relative Abweichung aller Varianten wird – wie auch bei den Bergwerken Ibbenbüren und Königsborn – verursacht, wenn die Kombination des maximalen Wertes für den Faktor „Resthohlraumvolumen" und die jeweiligen minimalen Werte der anderen Faktoren gewählt wird. Die mittlere relative Abweichung aller Varianten beträgt 6,8 % und ist demnach in etwa doppelt so hoch wie die des Bergwerks Ibbenbüren.

Abweichungen der berechneten Zuflussrate

Die relativen Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen Zeitreihen der Zuflussraten sind mit jenen der Bergwerke Ibbenbüren und Königsborn vergleichbar. Die mittlere relative Abweichung für die Zuflussrate (6,1 %) entspricht jener für die Grubenwasser(druck)fläche (6,8 %; Abbildung 39). Auch im analytischen Modell dieses Untertagebergwerks verursacht die Variation des Faktors „Resthohlraumvolumen" die geringste relative Abweichung (Varianten V18_WF und V19_WF; relative Abweichungen: je 0,8 %; Abbildung 39; Anhang 11). Wird hingegen der Faktor „Durchlässigkeitskoeffizient" variiert, so weichen die Modellkurven im Mittel 7,8 % von der Basisvariante ab (Variante V22_WF: 7,1 %; Variante V23_WF: 5,6 %; Abbildung 39; Anhang 11). Die mittleren relativen Abweichungen der anderen beiden Faktoren sind geringer (Faktor „Reichweite des Einflussbereichs": 2,7 % [Varianten V20_WF und V21_WF]; Faktor „Infiltrationsspende": 2,3 % [Varianten V24_WF und V25_WF]). Die Kombination der maximalen Werte der Faktoren „Reichweite des Einflussbereichs", „Durchlässigkeitskoeffizient" und „Infiltrationsspende" bewirkt die maximale relative Abweichung (Varianten V15_WF und V16_WF; relative Abweichungen: je 14,2 %; Abbildung 39; Anhang 11).

7.1.4 Bewertung der Modellergebnisse

Die geringen relativen Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen Zeitreihen der Grubenwasser(druck)fläche und der Zuflussrate der jeweiligen Basisvarianten (Varianten V17_XY) zeigen, dass die genutzten analytischen Modelle geeignet sind, die Entwicklungen der Grubenwasser(druck)fläche und der Zuflussrate in den betrachteten Untertagebergwerken darzustellen. Die systematische Variation der Faktoren spiegelt sich in unterschiedliche Ausmaßen in den Abweichungen wider, so dass die Signifikanz der einzelnen Faktoren für die Beschreibung der Grubenwasser(druck)fläche und der Zuflussrate ableitbar ist.

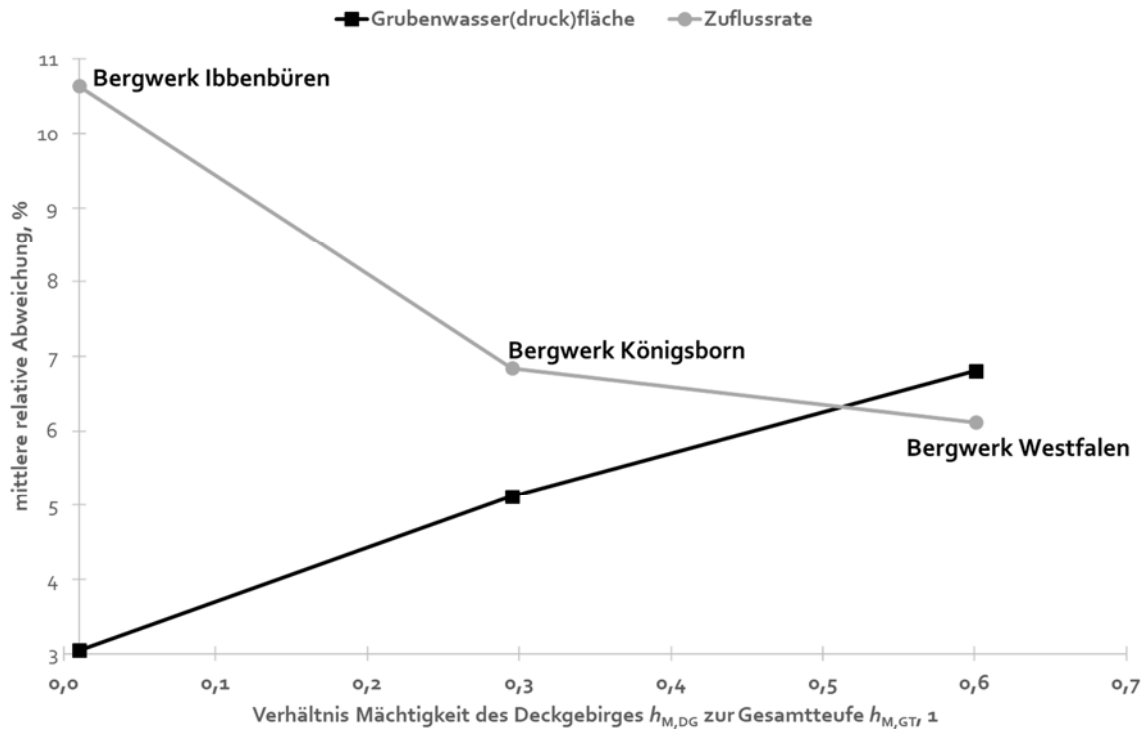


Abbildung 40: Vergleich der mittleren relativen Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen Zeitreihen der Grubenwasser(druck)fläche und der Zuflussrate in Abhängigkeit von dem Verhältnis zwischen der Deckgebirgsmächtigkeit und der Gesamtteufe eines Untertagebergwerks.

Für die Untertagebergwerke, die von keinem (Bergwerk Ibbenbüren) oder nur einem geringmächtigen Deckgebirge (Bergwerk Königsborn) überlagert werden, übt die hydraulische Durchlässigkeit des Gebirges keinen bis nur einen geringen Einfluss auf die Höhe der Grubenwasser(druck)fläche aus. Die Grubenwasser(druck)fläche im Bergwerk Westfalen, das die höchste Deckgebirgsmächtigkeit aufweist, wird hingegen deutlicher durch die hydraulische Gebirgsdurchlässigkeit beeinflusst. Diese Feststellung lässt sich damit erklären, dass das überlagernde Deckgebirge im Zuge eines Grubenwasseranstiegs einen höheren Einfluss nimmt, je mächtiger dieses ausgebildet ist (Abbildung 40). Der Faktorenkombination ist hingegen die minimale Abweichung zuzuordnen. Diese Abweichung ist mit jener vergleichbar, die die singuläre Variation des Faktors „Reichweite des Einflussbereichs“ bewirkt.

In den analytischen Modellen aller drei Untertagebergwerke zeigt sich, dass die größten Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen Zeitreihen der Grubenwasser(druck)fläche vorliegen, wenn eine Faktorenkombination ($V_{RHV}[+]$, $l_E[-]$, $k_f[-]$, $\dot{h}_{Inf}[-]$) genutzt wird, in der der maximale Wert für den Faktor „Resthohlraumvolumen“ sowie die minimalen Werte der anderen Faktoren gewählt wird (siehe die jeweiligen Varianten V2). Die auf dieser Faktorenkombination basierenden Modellkurven zeigen einen – im Vergleich zu den jeweiligen Messkurven – langsamer verlaufenden Anstiegsverlauf. Diese

Feststellung lässt sich damit erklären, dass das größere Hohlraumvolumen durch einen geringeren Zufluss aufgefüllt wird.

Für die Beschreibung der Zuflussrate ergibt sich für alle drei Untertagebergwerke ein einheitliches Bild. Die Zuflussrate entwickelt sich unabhängig von der Größe des vorhandenen Resthohlraumvolumens. Die relative Abweichung erhöht sich indes deutlich, wenn für die Faktoren „Reichweite des Einflussbereichs“, „Durchlässigkeitskoeffizient“ und „Infiltrationsspende“ gleichzeitig die jeweiligen maximalen Werte angenommen werden. Diese Faktorenkombination bewirkt durch das Zusammenspiel eines größeren hydraulisch wirk-samen Einflussbereichs und einer größeren vertikalen Zuflussspende ($l_E \times \dot{h}_{Inf}$) in Verbin-dung mit einer höheren hydraulischen Gebirgsdurchlässigkeit eine erhöhte Zustromrate in das Grubengebäude, die die tatsächliche Zustromrate zwischen 14 % und 26 % über-steigt.

Die mittlere relative Abweichung nimmt mit ansteigender Deckgebirgsmächtigkeit ab (Abbildung 40). Diese Entwicklung führt dazu, dass die Differenz zwischen den mittleren relativen Abweichungen bei der Grubenwasser(druck)fläche (blaue Kurve in Abbildung 40) und der Zuflussrate (rote Kurve in Abbildung 40) sich sukzessive annähern, je mächtiger das Deckgebirge ausgebildet ist. Während die Differenz zwischen den relativen Abwei-chungen in dem deckgebirgsfreien Untertagebergwerk maximal ist (7,6 %), ist der Unter-schied in dem Untertagebergwerk mit der höchsten Deckgebirgsmächtigkeit gering (0,7%).

7.1.5 Bewertung der Zuflussrate als Ergebnis der Modellierung

Mittels des analytischen Modells lässt sich die Entwicklung der Zuflussrate in ein Unterta-gebergwerk bilanzieren. Die Abweichungen zwischen den Zeitreihen der berechneten und gemessenen Daten betragen im Mittel bis zu 11 %. Während die Entwicklung der Gruben-wasser(druck)fläche anhand einer Vielzahl an Datenpunkten beschrieben wird (und daher eine vergleichsweise hohe Datengrundlage für die Bestimmung der mittleren Abweichung liefert), basiert die Entwicklung der Zuflussrate lediglich auf einer Messung vor Beginn des Grubenwasseranstiegs ($\dot{V}_{Zufluss,0}$; Abbildung 41; Tabelle 32). Da das Grubengebäude nach dem Beginn des Grubenwasseranstiegs nicht mehr zugänglich ist, kann die Zuflussrate nicht mehr gemessen werden. Die Entwicklung der Zuflussrate beruht daher auf einer Wasserbilanzierung, indem das analytische Modell die Zuflussrate aus dem Produkt des auffüllbaren (geogenen und anthropogenen) Hohlraumvolumens je m (in $m^3/m = m^2$) und des Grubenwasseranstiegsbetrags in m/d errechnet. Die Zuflussrate ist daher direkt ab-hängig von der Kenntnis der räumlichen Verteilung sowie der Größe des auffüllbaren Rest-hohlraumvolumens.

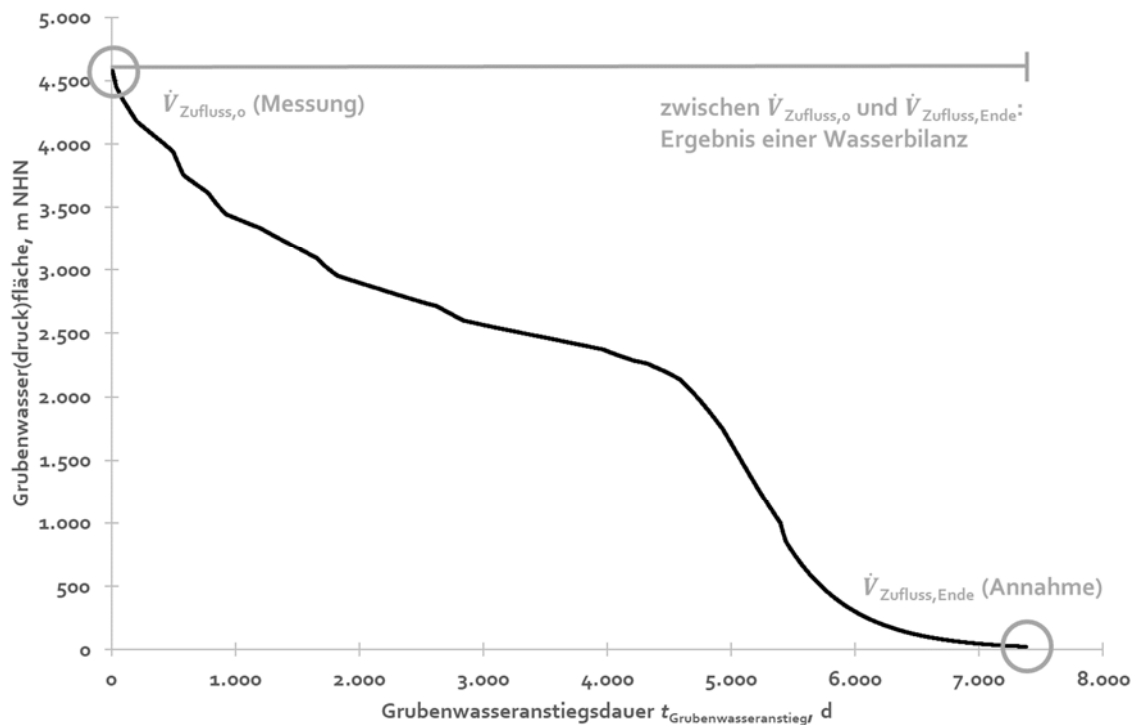


Abbildung 41: Datengrundlage der Entwicklung der Zuflussrate am Beispiel des Bergwerks Königsborn.

Da die statistische Auswertung einer geringen Datenmenge nicht repräsentativ und aussagekräftig ist und nicht als Grundlage zur Ableitung von Schlussfolgerungen dienen sollte, werden die Modellierungsergebnisse für die Zuflussrate für die folgende statistische Auswertung nicht weiter berücksichtigt.

7.2 Faktor- und termspezifische Wirkstärken

7.2.1 Allgemeines

Nach der im Abschnitt 7.1.4 vorgenommenen eher qualitativen Einschätzung der Wirksamkeit der Faktoren auf die Beschreibung der Grubenwasser(druck)fläche und der Zuflussrate wird im Folgenden ein mathematisches Analyseverfahren angewendet, mit Hilfe dessen die Wirkstärke eines Faktors auch quantitativ bestimmt werden kann. Dieses Verfahren basiert auf der statistischen Versuchsplanung (Design of Experiments; FISHER 1935). Dafür wird eine spezielle Statistiksoftware (MODDE Pro 12.1) verwendet (Abschnitt 3). Grundlage der Auswertung sind die relativen Abweichungen der jeweiligen Varianten (Anhang 11).

7.2.2 Signifikanzbewertung der Terme

Die Grundlagen der Bestimmung der Signifikanz eines Terms sind im Abschnitt 3.2.5 beschrieben. Die Ergebnisse der Signifikanzbewertung für die betrachteten Untertagebergwerke sind der Tabelle 33 sowie dem Anhang 12 zu entnehmen.

Tabelle 33: Für die Auswertung ausgeschlossene nicht-signifikante Terme.

	nicht-signifikante Terme
Bergwerk Ibbenbüren (vier Terme)	<p>Quadratische Terme:</p> <p>1.) $V_{RHV} \times V_{RHV}$</p> <p>Wechselwirkende Terme:</p> <p>1.) $V_{RHV} \times k_f$ 2.) $l_E \times k_f$ 3.) $k_f \times \dot{h}_{Inf}$</p>
Bergwerk Königsborn (ein Term)	<p>Quadratische Terme:</p> <p>1.) $V_{RHV} \times V_{RHV}$</p>
Bergwerk Westfalen (vier Terme)	<p>Quadratische Terme:</p> <p>1.) $\dot{h}_{Inf} \times \dot{h}_{Inf}$</p> <p>Wechselwirkende Terme:</p> <p>1.) $V_{RHV} \times l_E$ 2.) $l_E \times k_f$ 3.) $l_E \times \dot{h}_{Inf}$</p>

Für das Bergwerk Ibbenbüren werden der quadratische Term des Faktors „Resthohlraumvolumen“ sowie die drei wechselwirkenden Terme, in denen der Faktor „Durchlässigkeitskoeffizient“ als Faktor berücksichtigt wird, als nicht-signifikant gewertet und für die weitere Bewertung ausgeschlossen (Tabelle 33; Anhang 12). Zwar überschreitet der lineare Term des Faktors „Durchlässigkeitskoeffizient“ das Signifikanzniveau (p -Wert = 0,35), allerdings bewirkt dessen Ausschluss keine Verbesserung des Q^2 -Wertes (Abschnitt 3.2.5). Für die Bildung des Beschreibungsmodells werden daher zehn Terme verwendet. Die Fehlerkonstante ε beträgt 1,57 %.

Für das Bergwerk Königsborn wird lediglich der quadratische Term des Faktors „Resthohlraumvolumen“ als nicht-signifikant gewertet und für die weitere Bewertung ausgeschlossen (Tabelle 33; Anhang 12). Neben den p -Werten der linearen Termen überschreiten auch die p -Werte der Terme „ $k_f \times k_f$ “ und „ $k_f \times \dot{h}_{Inf}$ “ das Signifikanzniveau von 0,05 (Anhang 12). Allerdings bewirkt deren Ausschluss keine Verbesserung des Q^2 -Wertes, so dass diese Terme für die weitere Bewertung beibehalten bleiben. Für die Bildung des Beschreibungsmodells werden daher 13 Terme verwendet. Die Fehlerkonstante ε beträgt 2,46 %.

Für das Bergwerk Westfalen werden vier Terme als nicht-signifikant eingestuft und für die weitere Auswertung ausgeschlossen. Dabei handelt es sich um den quadratischen Term des Faktors „Infiltrationsspende“ sowie um die wechselwirkenden Terme, in denen der Faktor „Reichweite des Einflussbereichs“ berücksichtigt wird (Tabelle 33; Anhang 12). Die p -Werte aller linearen Terme sowie der quadratische Term des Faktors „Reichweite des Einflussbereichs“ überschreiten das Signifikanzniveau von 0,05. Dennoch verbleiben diese Bestandteile der Auswertung, da die Prüfung des Ausschlusses keine Verbesserung des Q^2 -Wertes ergibt. Für die Bildung des Beschreibungsmodells werden zehn Terme verwendet. Die Fehlerkonstante ε beträgt 3,50 %.

Der Abgleich mit den Modellierungsergebnissen belegt, dass jene wechselwirkende Terme aufgrund ihrer Nicht-Signifikanz für die Beschreibung der Beziehung ausgeschlossen werden, in denen der Faktor Berücksichtigung findet, der die geringsten Abweichungen infolge dessen Variation verursacht (Bergwerk Ibbenbüren: Faktor „Durchlässigkeitskoeffizient“ [Abschnitt 7.1.1]. Bergwerk Westfalen: Faktor „Reichweite des Einflussbereichs“ [Abschnitt 7.1.3]).

7.2.3 Statistische Kenndaten zur Beschreibung der Modellgüte

Für jedes Untertagebergwerk wird die Güte des Beschreibungsmodells anhand der statistischen Kenndaten R^2 - und Q^2 -Wert für unterschiedliche Ansätze der statistischen Versuchsplanung bestimmt (Abschnitt 3.2.4 und Abschnitt 3.2.5). Neben dem durch die Statistiksoftware empfohlenen vollständigen faktoriellen Versuchsplan wird auch der um zusätzliche Varianten erweiterte vollständige faktorielle Versuchsplan getestet, der auch nicht-lineare Beziehungen berücksichtigt. Der letzt genannte Versuchsplan ist durch den Ausschluss nicht-signifikanter Terme optimiert. Der Versuchsplan mit den höchsten statistischen Kenndaten ist in der Tabelle 34 bis Tabelle 36 hervorgehoben. Werte, die die Kriterien eines guten Beschreibungsmodells indes nicht erfüllen (Abschnitt 3.3.4), sind in roter Farbe kenntlich gemacht.

Die Gegenüberstellung aller statistischen Kenndaten zeigt, dass der ergänzte vollständige faktorielle Versuchsplan das Güteoptimum für die Beschreibungsmodelle aller drei Untertagebergwerke liefert (Abbildung 42; Tabelle 34 bis Tabelle 36). R^2 -Werte zwischen 0,95 und 0,97 sowie Q^2 -Werte zwischen 0,75 und 0,92 belegen für alle Beschreibungsmodelle eine sehr gute Qualität und bestätigen damit deren Anwendbarkeit, die Modelleingangsdaten zu beschreiben (R^2 -Wert $> 0,5$) und Prognosen zu stellen (Q^2 -Wert $> 0,5$). Auch das Kriterium der geringen Differenz zwischen beiden statistischen Kenndaten ($R^2 - Q^2 < 0,3$) wird für alle Untertagebergwerke erfüllt.

Tabelle 34: Statistische Kenndaten des Beschreibungsmodells für das Bergwerk Ibbenbüren (Abbaubereich „Westfeld“). Der Versuchsplan mit der besten Anpassungsgüte ist hervorgehoben.

	Grubenwasser(druck)fläche		
	R^2	Q^2	R^2-Q^2
Vollständiger faktorieller Versuchsplan	0,91	0,79	0,12
Ergänzter vollständiger faktorieller Versuchsplan	0,98	0,90	0,08
Ergänzter vollständiger faktorieller Versuchsplan mit Ausschluss nicht-signifikanter Terme	0,97	0,92	0,05

Tabelle 35: Statistische Kenndaten des Beschreibungsmodells für das Bergwerk Königsborn. Der Versuchsplan mit der besten Anpassungsgüte ist hervorgehoben.

	Grubenwasser(druck)fläche		
	R^2	Q^2	R^2-Q^2
Vollständiger faktorieller Versuchsplan	0,85	0,55	0,30 *
Ergänzter vollständiger faktorieller Versuchsplan	0,95	0,71	0,24
Ergänzter vollständiger faktorieller Versuchsplan mit Ausschluss nicht-signifikanter Terme	0,95	0,75	0,20

* Kriterium für ein gutes Beschreibungsmodell wird nicht erfüllt ($[R^2 - Q^2] < 0,30$).

Tabelle 36: Statistische Kenndaten des Beschreibungsmodells für das Bergwerk Westfalen. Der Versuchsplan mit der besten Anpassungsgüte ist hervorgehoben.

	Grubenwasser(druck)fläche		
	R^2	Q^2	R^2-Q^2
Vollständiger faktorieller Versuchsplan	0,88	0,56	0,32 *
Ergänzter vollständiger faktorieller Versuchsplan	0,97	0,76	0,21
Ergänzter vollständiger faktorieller Versuchsplan mit Ausschluss nicht-signifikanter Terme	0,95	0,84	0,11

* Kriterium für ein gutes Beschreibungsmodell wird nicht erfüllt ($[R^2 - Q^2] < 0,30$).

Durch die Ergänzung weiterer Varianten erhöht sich der R^2 -Wert aller Untertagebergwerke im Mittel um rd. 10 %. Die Q^2 -Werte steigen zwischen rd. 14 % (Bergwerk Ibbenbüren) und rd. 36 % (Bergwerk Westfalen; Tabelle 37). Der Ausschluss nicht-signifikanter

Abschnitt 7.2 – Faktor- und termspezifische Wirkstärken

Terme macht sich weniger in einer Veränderung des R^2 -Werts, dafür im Q^2 -Wert bemerkbar. Dieser Wert steigt um weitere rd. 2 % bis 11 % (Tabelle 37).

Tabelle 37: Prozentuale Veränderung der statistischen Kenndaten (R^2 - und Q^2 -Wert) durch Anpassungen des statistischen Versuchsplans.

Veränderung durch	BW Ibbenbüren		Bergwerk Königsborn		Bergwerk Westfalen	
	R^2	Q^2	R^2	Q^2	R^2	Q^2
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Ergänzung weiterer Varianten	+7,7	+13,9	+11,8	+29,1	+10,2	+35,7
Ausschluss nicht-signifikanter Termen *	-1,0	+2,2	±0,0	+5,6	-2,1	+10,5
Gesamtveränderung	+6,6	+16,5	+11,8	+36,4	+8,0	+50,0

* im Vergleich zu den Werten der statistischen Kenndaten nach Ergänzung weiterer Varianten.

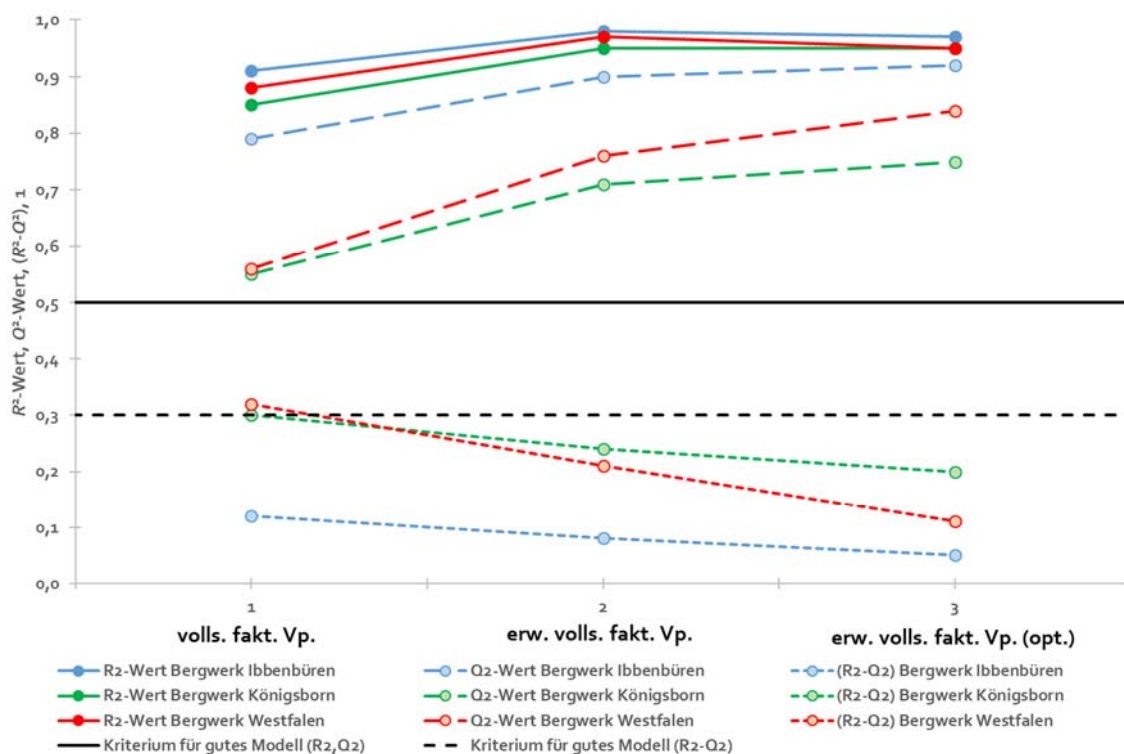


Abbildung 42: Veränderung der statistischen Kenndaten (R^2 , Q^2 , $[R^2-Q^2]$) durch Anpassung des statistischen Versuchsplans (Abkürzungen: volls. fakt. Vp.: vollständiger faktorieller Versuchsplan; erw. volls. fakt. Vp.: erweiterter vollständiger faktorieller Versuchsplan; erw. volls. fakt. Vp. [opt.]: erweiterter vollständiger faktorieller Versuchsplan mit Ausschluss nicht-signifikanter Terme).

Der Vergleich der erzielten Verbesserungen zeigt, dass diese Modellanpassungen die höchsten Auswirkungen haben, je mächtiger das Deckgebirge und somit komplexer das

Untertagebergwerk im Hinblick auf die geologische Beschaffenheit ist (Tabelle 37). Da diese Maßnahmen vor allem den Q^2 -Wert steigern, erweist sich die Anpassung des Beschreibungsmodells vor allem dann als zielführend, wenn das analytische Modell für die Erstellung von Prognosen genutzt werden soll (Abbildung 42).

7.2.4 Ergebnisse zu den Wirkstärken der Faktoren und Termen

Die Wirkstärken der einzelnen Faktoren (lineare Terme) sowie der wechselwirkenden und quadratischen Termen werden durch die Statistiksoftware automatisch bestimmt. Die Faktoren sind in den nachfolgenden Abbildungen wie folgt abgekürzt:

- **V_RHV:** bergmännisch geschaffenes Resthohlraumvolumen,
- **I_E:** Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs,
- **h_Inf:** flächenspezifische vertikale Infiltrationsspende,
- **k_f:** Durchlässigkeitskoeffizient.

Das Häkchen als Akzent über den Formelzeichen zeigt an, dass die Abweichung des untersuchten Wertes des jeweiligen Faktors einer Variante zum optimalen Wert verwendet wird (Gleichung 64). Dieser Akzent ist in den Abbildungen nicht darstellbar. Daher gilt in den folgenden Abbildungen (zum Beispiel): $V_{RHV} = \check{V}_{RHV}$.

7.2.4.1 Bergwerk Ibbenbüren

Nach Ausschluss der nicht-signifikanten Terme verbleiben noch zehn Terme. Neben den vier linearen Termen besitzen jeweils drei quadratische und drei wechselwirkende Terme eine ausreichende Signifikanz für die Beschreibung der Beziehung der Faktoren und der Veränderung der Grubenwasser(druck)fläche. Die Terme sind entsprechend der Höhe ihrer Wirkstärke in der Abbildung 43 sortiert.

Die Wirkstärken der Terme „ $\check{l}_E \times \check{h}_{Inf}$ “ ($K_{\Delta h} = 1,75$), „ $\check{l}_E \times \check{l}_E$ “ ($K_{\Delta h} = 1,46$) und „ $\check{h}_{Inf} \times \check{h}_{Inf}$ “ ($K_{\Delta h} = 1,16$) betragen $> |1|$. Die Wirkstärken der anderen Terme sind geringer (Anhang 12). Die Wirkstärken der linearen Termen schwanken zwischen $K_{\Delta h} = |0,10|$ (Durchlässigkeitskoeffizient) und $K_{\Delta h} = |0,45|$ (Reichweite des Einflussbereichs). Diese liegen somit unterhalb jener der Produkte aus zwei Faktoren. Die Fehlerkonstante ε , die den Teil des zu beschreibenden Prozesses darstellt, der nicht durch das gewählte Beschreibungsmodell erklärt werden kann, beträgt 1,57 %.

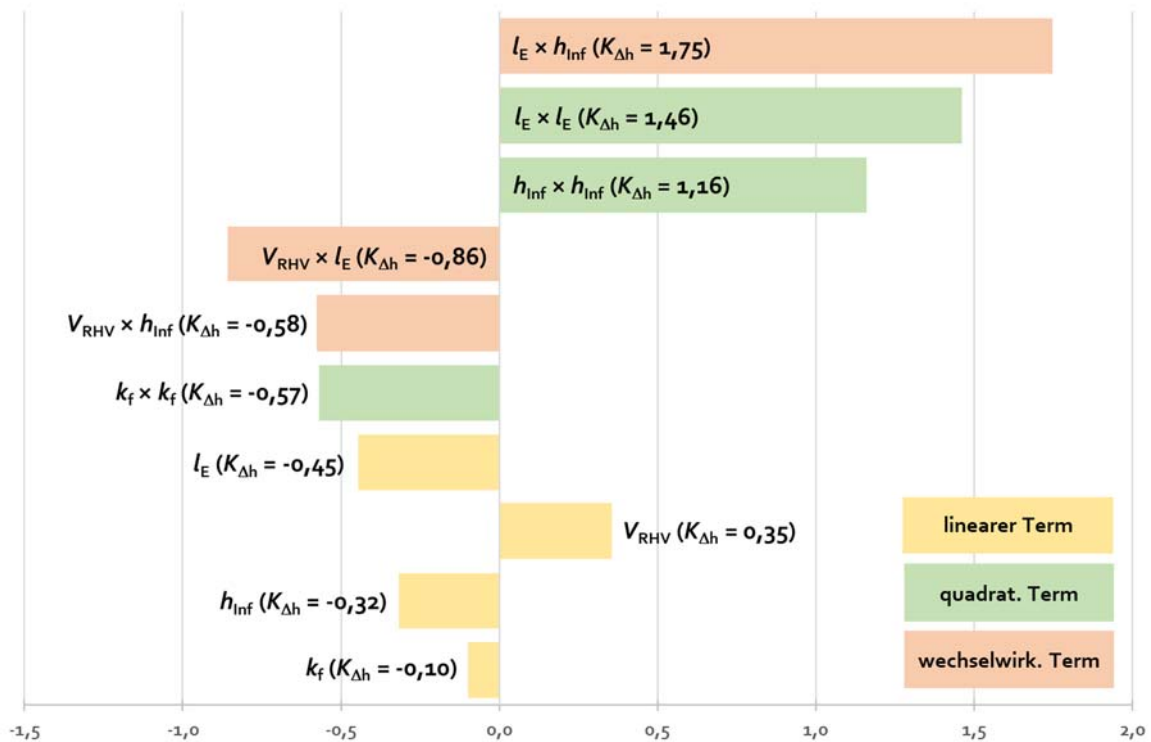


Abbildung 43: Tornadodiagramm mit den Wirkstärken auf die Abweichung zwischen den Zeitreihen der berechneten und gemessenen Grubenwasser(druck)fläche für das Bergwerk Ibbenbüren (Abbaubereich „Westfeld“).

Die Reihenfolge der Wirkstärken ist bei den linearen und quadratischen Termen identisch. Der lineare als auch der quadratische Term des Faktors „Reichweite des Einflussbereichs“ besitzt die höchste Signifikanz (Abbildung 43). Bei den linearen Termen nehmen die Faktoren „Resthohlraumvolumen“ und „Infiltrationsspende“ mit $K_{\Delta h} = 0,35$ bzw. $K_{\Delta h} = |0,32|$ eine vergleichbare Bedeutung ein. Der quadratische Term des Faktors „Resthohlraumvolumen“ wird hingegen als nicht-signifikant gewertet. Dem Faktor „Durchlässigkeitskoeffizient“ ist sowohl als linearer als auch quadratischer Term die geringste Einflussnahme zuzuordnen.

Lineare Terme (Abs: Absoluter Betrag)

$$\text{Abs}(K_{\Delta h}[\tilde{l}_E]) = 0,45 > \text{Abs}(K_{\Delta h}[\tilde{V}_{RHH}]) = 0,35 > \text{Abs}(K_{\Delta h}[\tilde{h}_{Inf}]) = 0,32 > \text{Abs}(K_{\Delta h}[\tilde{k}_f]) = 0,10$$

Quadratische Terme (Abs: Absoluter Betrag)

$$\text{Abs}(K_{\Delta h}[\tilde{l}_E \times \tilde{l}_E]) = 1,46 > \text{Abs}(K_{\Delta h}[\tilde{h}_{Inf} \times \tilde{h}_{Inf}]) = 1,16 > \text{Abs}(K_{\Delta h}[\tilde{k}_f \times \tilde{k}_f]) = 0,57$$

Die Wirkstärken der wechselwirkenden Terme werden vor allem durch die dominanten linearen Terme bestimmt. So sind den Termen aus den Faktoren mit den höchsten Wirkstärken auch die höchsten wechselwirkenden Wirkstärken zuzuordnen. Es gibt keine signifikanten wechselwirkenden Terme, in denen der Faktor „Durchlässigkeitskoeffizient“ enthalten ist (Abbildung 43).

Wechselwirkende Terme (Abs: Absoluter Betrag)

$$\text{Abs}(K_{\Delta h}[\check{l}_E \times \check{h}_{\text{Inf}}]) = 1,75 > \text{Abs}(K_{\Delta h}[\check{V}_{\text{RHH}} \times \check{l}_E]) = 0,86 > \text{Abs}(K_{\Delta h}[\check{V}_{\text{RHH}} \times \check{h}_{\text{Inf}}]) = 0,58$$

7.2.4.2 Bergwerk Königsborn

Für das Bergwerk Königsborn wird lediglich der quadratische Term des Faktors „Resthohlraumvolumen“ als nicht-signifikant gewertet. Damit verbleiben 13 Terme (vier lineare, drei quadratische und sechs wechselwirkende Terme), um die Beziehung zwischen den Faktoren und der Veränderung der Grubenwasser(druck)fläche zu beschreiben.

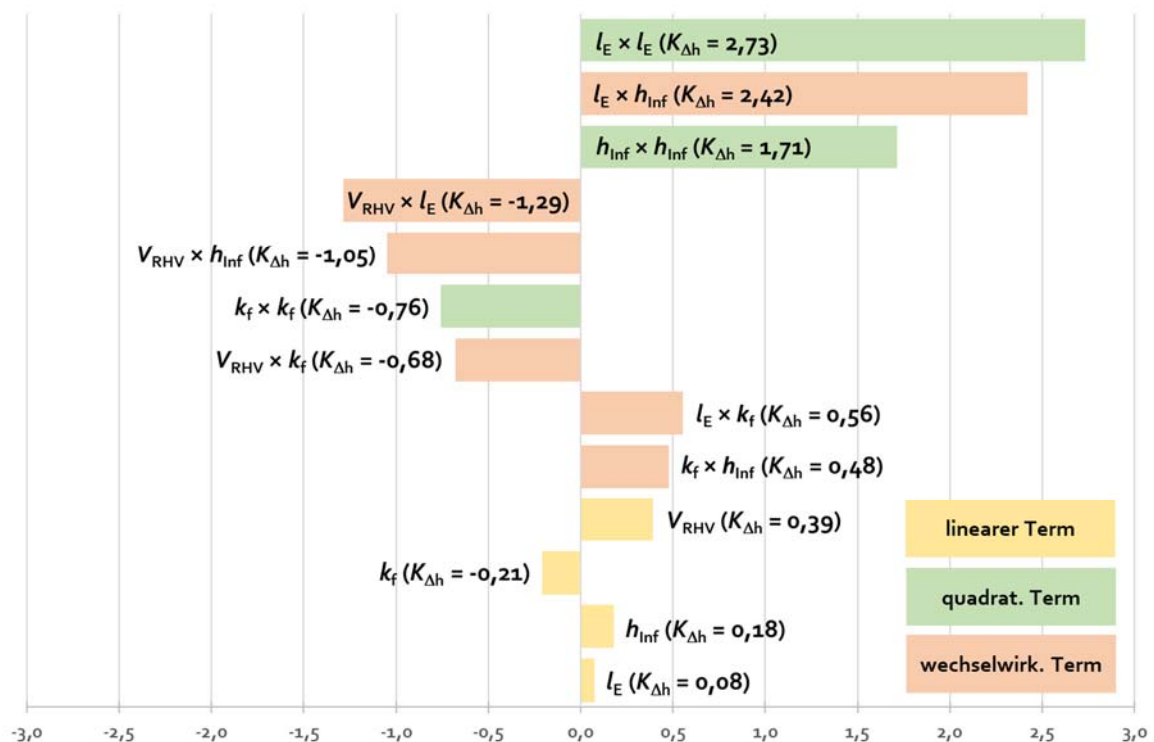


Abbildung 44: Tornadodiagramm mit den Wirkstärken auf die Abweichung zwischen den Zeitreihen der berechneten und gemessenen Grubenwasser(druck)fläche für das Bergwerk Königsborn.

Die statistische Auswertung ergibt, dass die Wirkstärken von fünf Termen $> |1|$ betragen (Abbildung 44; Anhang 12). Die Terme „ $\check{l}_E \times \check{l}_E$ “ ($K_{\Delta h} = 2,73$) und „ $\check{l}_E \times \check{h}_{\text{Inf}}$ “ ($K_{\Delta h} = 2,42$) besitzen dabei die höchsten Wirkstärken. Die linearen Terme weisen wiederum die geringsten Wirkstärken auf. Die Fehlerkonstante ε , die den Teil des zu beschreibenden Prozesses darstellt, der nicht durch das gewählte Beschreibungsmodell erklärt werden kann, beträgt 2,46 %.

Die Reihenfolge der linearen und quadratischen Terme unterscheiden sich. Die höchste Wirkstärke hat der Faktor „Resthohlraumvolumen“ ($K_{\Delta h} = 0,39$), dessen quadratischer Term allerdings keine Signifikanz besitzt. Während die Wirkstärken der Faktoren „Durch-

lässigkeitskoeffizient“ ($K_{\Delta h} = |0,21|$) und „Infiltrationsspende“ ($K_{\Delta h} = 0,18$) bei den linearen Terme vergleichbar sind, unterscheiden sich deren Bedeutungen deutlicher, wenn deren quadratische Terme betrachtet werden ($K_{\Delta h}[\tilde{h}_{\text{Inf}} \times \tilde{h}_{\text{Inf}}] = 1,71$ bzw. $K_{\Delta h}[\tilde{k}_f \times \tilde{k}_f] = |0,76|$). Dem Faktor „Reichweite des Einflussbereichs“ kommt als linearer Term die geringste Bedeutung zu ($K_{\Delta h} = 0,08$), als quadratischer Term hingegen die höchste ($K_{\Delta h} = 2,73$).

Lineare Terme (Abs: Absoluter Betrag)

$$\text{Abs}(K_{\Delta h}[\tilde{V}_{\text{RHV}}]) = 0,39 > \text{Abs}(K_{\Delta h}[\tilde{k}_f]) = 0,21 > \text{Abs}(K_{\Delta h}[\tilde{h}_{\text{Inf}}]) = 0,18 > \text{Abs}(K_{\Delta h}[\tilde{l}_E]) = 0,08$$

Quadratische Terme (Abs: Absoluter Betrag)

$$\text{Abs}(K_{\Delta h}[\tilde{l}_E \times \tilde{l}_E]) = 2,73 > \text{Abs}(K_{\Delta h}[\tilde{h}_{\text{Inf}} \times \tilde{h}_{\text{Inf}}]) = 1,71 > \text{Abs}(K_{\Delta h}[\tilde{k}_f \times \tilde{k}_f]) = 0,76$$

Wechselwirkende Terme sind allesamt signifikant und werden daher nicht ausgeschlossen. Die wechselwirkenden Terme, in denen der Faktor „Durchlässigkeitskoeffizient“ enthalten ist, besitzen im Beschreibungsmodell die geringsten Wirkstärken.

Wechselwirkende Terme (Abs: Absoluter Betrag)

$$\begin{aligned} \text{Abs}(K_{\Delta h}[\tilde{l}_E \times \tilde{h}_{\text{Inf}}]) &= 2,42 > \text{Abs}(K_{\Delta h}[\tilde{V}_{\text{RHV}} \times \tilde{l}_E]) = 1,29 > \text{Abs}(K_{\Delta h}[\tilde{V}_{\text{RHV}} \times \tilde{h}_{\text{Inf}}]) = 1,05 \\ &> \text{Abs}(K_{\Delta h}[\tilde{V}_{\text{RHV}} \times \tilde{k}_f]) = 0,68 > \text{Abs}(K_{\Delta h}[\tilde{l}_E \times \tilde{k}_f]) = 0,56 > \text{Abs}(K_{\Delta h}[\tilde{k}_f \times \tilde{h}_{\text{Inf}}]) = 0,48 \end{aligned}$$

7.2.4.3 Bergwerk Westfalen

Durch Ausschluss von sechs nicht-signifikanten Terme verbleiben vier lineare und jeweils drei quadratische und wechselwirkende Terme, die die Beziehung zwischen den Faktoren und der Veränderung der Grubenwasser(druck)fläche beschreiben (Abbildung 45).

Mit Ausnahme des wechselwirkenden Terms „ $\tilde{k}_f \times \tilde{h}_{\text{Inf}}$ “ ($K_{\Delta h} = 0,97$) betragen die Wirkstärken sämtlicher Terme aus Produkten (quadratisch und wechselwirkend) $> |1|$. Die Terme mit den höchsten Wirkstärken sind „ $\tilde{V}_{\text{RHV}} \times \tilde{k}_f$ “ ($K_{\Delta h} = |4,21|$) und „ $\tilde{V}_{\text{RHV}} \times \tilde{V}_{\text{RHV}}$ “ ($K_{\Delta h} = 3,36$). Die Wirkstärken der linearen Terme sind wiederum am geringsten. Die Fehlerkonstante ε , die den Teil des zu beschreibenden Prozesses darstellt, der nicht durch das gewählte Beschreibungsmodell erklärt werden kann, beträgt 3,50 %.

Die Reihenfolge ist bei den linearen und quadratischen Termen – wie beim Bergwerk Königsborn – unterschiedlich. Bei den linearen Termen bilden die Faktoren „Durchlässigkeitskoeffizient“ ($K_{\Delta h} = |0,28|$) und „Reichweite des Einflussbereichs“ ($K_{\Delta h} = |0,25|$) ein Paar mit höheren Wirkstärken, die Faktoren „Infiltrationsspende“ ($K_{\Delta h} = |0,09|$) und „Resthohlraumvolumen“ ($K_{\Delta h} = 0,08$) indes ein Paar mit geringeren Wirkstärken. Die Wirkstärken in den jeweiligen Paaren sind vergleichbar.

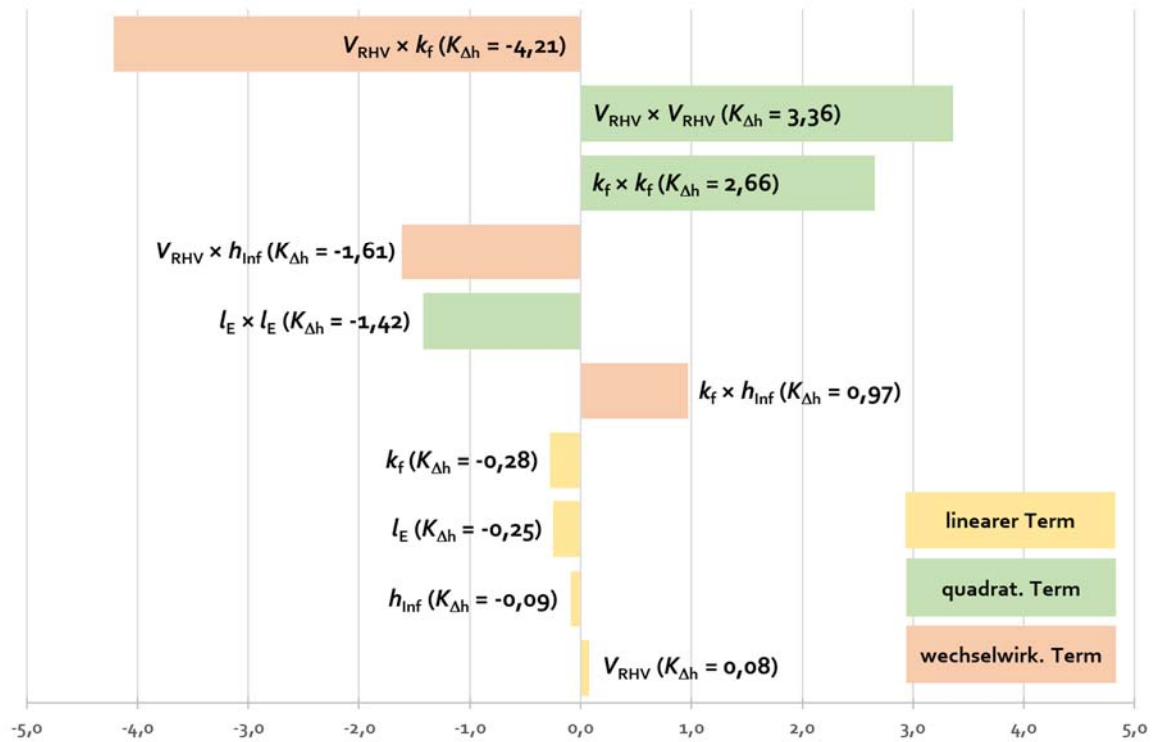


Abbildung 45: Tornadodiagramm mit den Wirkstärken auf die Abweichung zwischen den Zeitreihen der berechneten und gemessenen Grubenwasser(druck)fläche für das Bergwerk Westfalen.

Wie beim Bergwerk Königsborn verändert sich die Einflussnahme der Wirkstärken, wenn für die Faktoren die jeweiligen quadratischen Terme gebildet werden. Der als lineare Term eher unbedeutende Faktor „Resthohlraumvolumen“ ist als quadratischer Term die höchste Wirkstärke zuzuordnen ($K_{\Delta h} = 3,36$), während der quadratische Term des Faktors „Reichweite des Einflussbereichs“ ($K_{\Delta h} = |1,42|$) gegenüber dem linearen Term an Bedeutung verliert.

Lineare Terme (Abs: Absoluter Betrag)

$$\text{Abs}(K_{\Delta h}[\check{k}_f]) = 0,28 > \text{Abs}(K_{\Delta h}[\check{l}_E]) = 0,25 > \text{Abs}(K_{\Delta h}[\check{h}_{Inf}]) = 0,09 > \text{Abs}(K_{\Delta h}[\check{V}_{RHV}]) = 0,08$$

Quadratische Terme (Abs: Absoluter Betrag)

$$\text{Abs}(K_{\Delta h}[\check{V}_{RHV} \times \check{V}_{RHV}]) = 3,36 > \text{Abs}(K_{\Delta h}[\check{k}_f \times \check{k}_f]) = 2,66 > \text{Abs}(K_{\Delta h}[\check{l}_E \times \check{l}_E]) = 1,42$$

Anders als beim Bergwerk Ibbenbüren (Abschnitt 7.2.4.1) sind im Beschreibungsmodell des Bergwerks Westfalen die Terme signifikant, in denen der Faktor „Durchlässigkeitskoeffizient“ enthalten ist.

Wechselwirkende Terme (Abs: Absoluter Betrag)

$$\text{Abs}(K_{\Delta h}[\check{V}_{RHV} \times \check{k}_f]) = 4,21 > \text{Abs}(K_{\Delta h}[\check{V}_{RHV} \times \check{h}_{Inf}]) = 1,61 > \text{Abs}(K_{\Delta h}[\check{k}_f \times \check{h}_{Inf}]) = 0,97$$

7.2.5 Mathematische Begründung der Wirkstärken

7.2.5.1 Zielsetzung

Im Sinne des praktischen Nutzens werden die Faktoren in Abhängigkeit von der Lagerstättencharakteristik in Klassen priorisiert. Dazu wird die Sensitivität des verwendeten analytischen Modells auf die Faktorenvariation bestimmt.

7.2.5.2 Multiple Regression

Die Beziehung der vier untersuchten Faktoren (Resthohlraumvolumen V_{RHV} , Reichweite des Einflussbereichs l_E , Durchlässigkeitskoeffizient k_f , Infiltrationsspende h_{Inf}) und der Abweichung $y_{\Delta h}$ zwischen den Zeitreihen der berechneten und gemessenen Grubenwasser(druck)fläche kann annähernd durch ein nicht-lineares, multiples Beschreibungsmodell beschrieben werden, das aus linearen, quadratischen und wechselwirkenden Termen besteht. Die jeweiligen Regressionskoeffizienten stehen für die Wirkstärken $K_{\Delta h}$ der Terme. Vereinfacht für zwei Faktoren erklärt (hier: Resthohlraumvolumen \check{V}_{RHV} und Durchlässigkeitskoeffizient \check{k}_f), lautet dieses Beschreibungsmodell im Allgemeinen wie folgt:

$$y_{\Delta h}(\check{V}_{RHV}; \check{k}_f) = (K_{\Delta h, \check{V}_{RHV}} \times \check{V}_{RHV}) + (K_{\Delta h, \check{k}_f} \times \check{k}_f) + (K_{\Delta h, \check{V}_{RHV}^2} \times \check{V}_{RHV}^2) + (K_{\Delta h, \check{k}_f^2} \times \check{k}_f^2) + (K_{\Delta h, \check{V}_{RHV}\check{k}_f} \times \check{V}_{RHV} \times \check{k}_f) + \varepsilon \quad 63$$

Die Variablen (\check{V}_{RHV} und \check{k}_f in Gleichung 63) stehen für die relativen Abweichungen (in %) der untersuchten Faktoren von den jeweiligen modellgestützt ermittelten optimalen Werte. Im Allgemeinen gilt:

$$\check{X}_n = x_V - x_{oW} \quad 64$$

mit

\check{X}_n	=	unabhängiger Faktor, der die zu analysierende Ausgangsvariable beeinflusst; hier: Abweichung des untersuchten Wertes einer Variante zum optimalen Wert ($\check{X}_n = \check{V}_{RHV}$ oder \check{l}_E oder \check{k}_f oder \check{h}_{Inf} ; 1),
x_V	=	Wert einer Variante (in Bezug zum optimalen Wert; 1 oder %),
x_{oW}	=	modellgestützt ermittelter optimaler Wert (= 1 bzw. 100 %; 1 oder %).

Beispiel:

Der modellgestützt ermittelte optimale Wert für das Resthohlraumvolumen des Bergwerks Königsborn beträgt $x_{oW, RHV} = 10.087.782 \text{ m}^3$. Dieser Wert entspricht 100 % (bzw. 1). Soll die Auswirkung eines um 10 % erhöhten Resthohlraumvolumens ($x_{V, RHV} = 11.096.560 \text{ m}^3$; entspricht 110 % bzw. 1,1) untersucht werden, so ist für \check{V}_{RHV} folgender Wert einzusetzen:

$$\check{V}_{\text{RHV}} = 1,1 - 1 = 0,1 (= 10 \%) \quad (64)$$

Jede Faktorenkombination resultiert in eine Abweichung zwischen den Zeitreihen der (auf Grundlage dieser Faktorenkombination) berechneten und gemessenen Grubenwasser(druck)fläche. Die zu analysierende Ausgangsvariable $y_{\Delta h}$ gibt den Wert der Abweichung wieder. Je größer dieser Wert ist, desto größer ist die Abweichung zwischen den Zeitreihen der berechneten und der gemessenen Grubenwasser(druck)fläche. Da es sich bei dem multiplen Beschreibungsmodell bedingt durch den vorgenommenen Ausschluss nicht-signifikanter Terme sowie der Verwendung von Termen bis maximal zum zweiten Grad (d. h. x^2 [parabolisch]; Terme höherer Exponenten [z. B. x^3 , x^4 , ...] werden nicht berücksichtigt) um eine Annäherung an die „tatsächliche“ Abweichung handelt, beschreibt die Fehlerkonstante ε die verbleibende relative Abweichung, wenn für jeden Faktor der jeweilige optimale Wert verwendet wird.

Für jeden Faktor wird ein Vertrauensbereich von $\pm 10 \%$ um den optimalen Wert festgelegt, um z. B. Unsicherheiten bei der Faktorenbestimmung oder auch der lokalen Unterschiede in der räumlichen Verteilung der jeweiligen Faktoren Rechnung zu tragen. Werte außerhalb des Vertrauensbereichs ($< -10 \%$ bzw. $> 10 \%$) werden als nicht vertrauensvoll betrachtet und finden bei der Untersuchung keine Berücksichtigung. Es werden demnach nur die Werte der Faktoren betrachtet, die nahe den jeweiligen optimalen Werte liegen ($-0,1 < \check{X}_n < +0,1$).

7.2.5.3 Partielle Differentialrechnung

Das Ergebnis der partiellen Ableitung beschreibt die Tangentensteigung an einer untersuchten Stelle des quadratischen Beschreibungsmodells und somit die lokalen Veränderungen dieser Funktion, wenn sich eine Variable x um einen beliebigen Betrag Δx verändert (Abschnitt 2.4.2). Um den singulären Einfluss eines Faktors in einem vierdimensionalen Koordinatensystem zu evaluieren, wird ein Faktor mittels der entsprechenden partiellen Ableitung untersucht, während die anderen drei Faktoren auf Null (entspricht dem optimalen Wert) gesetzt und konstant gehalten werden. Lediglich der Faktor, nach dem abgeleitet wird, ist nun die einzige unabhängige Variable. Am Beispiel der Gleichung 63 lautet die partielle Ableitung nach dem Faktor „Resthohlraumvolumen“ wie folgt:

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{V}_{\text{RHV}}}(\check{V}_{\text{RHV}}; \check{l}_E; \check{k}_f; \check{h}_{\text{Inf}}) = K_{\Delta h, \check{V}_{\text{RHV}}} + (2 \times K_{\Delta h, \check{V}_{\text{RHV}}^2} \times \check{V}_{\text{RHV}}) + (K_{\Delta h, \check{V}_{\text{RHV}}} \check{k}_f \times \check{k}_f) \quad (63)$$

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{V}_{\text{RHV}}}(\check{V}_{\text{RHV}}; 0; 0; 0) = K_{\Delta h, \text{RHV}} + (2 \times K_{\Delta h, \check{V}_{\text{RHV}}^2} \times \check{V}_{\text{RHV}}) \quad (63)$$

Das Verhalten des Beschreibungsmodells (Sensitivität) auf die Variation eines Faktors wird innerhalb des vorab festgelegten Vertrauensbereichs für jeden Faktor x von $-0,1 < \check{X}_n < +0,1$ (d. h. relative Abweichung von $\pm 10\%$ um den optimalen Wert) ermittelt. Darüber hinaus liegende Abweichungen werden als nicht vertrauenswürdige Modelleingangsdaten gewertet.

Der durchschnittliche Funktionswert innerhalb eines um den Nullpunkt symmetrisch angelegten Vertrauensbereichs $(-0,1; 0,1)$ ergibt sich aus der vierfachen Integration der partiellen Ableitung (Abschnitt 2.4.2). Am Beispiel der Gleichung 63 lautet der Mittelwertsatz der Integralrechnung wie folgt:

$$\begin{aligned}
 \bar{y}_{\Delta h, \check{V}_{RHV}}(\check{V}_{RHV}; l_E; \check{k}_f; \check{h}_{Inf}) &= \frac{1}{0,2^4} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{V}_{RHV}} d\check{V}_{RHV} dl_E d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} \\
 &= \frac{1}{0,2^4} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} K_{\Delta h, \check{V}_{RHV}} + (2 \times K_{\Delta h, \check{V}_{RHV}^2} \times \check{V}_{RHV}) d\check{V}_{RHV} dl_E d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} K_{\Delta h, \check{V}_{RHV}} \times \frac{\check{V}_{RHV}}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} + \left(\frac{2 \times K_{\Delta h, \check{V}_{RHV}^2}}{2} \times \frac{\check{V}_{RHV}^2}{0,2} \right) \Big|_{-0,1}^{0,1} dl_E d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} K_{\Delta h, \check{V}_{RHV}} \times \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} + \left(\frac{2 \times K_{\Delta h, \check{V}_{RHV}^2}}{2} \times \frac{0,1^2 - (-0,1)^2}{0,2} \right) dl_E d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} K_{\Delta h, \check{V}_{RHV}} dl_E d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} = \frac{K_{\Delta h, \check{V}_{RHV}}}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} dl_E d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} \\
 &= \frac{K_{\Delta h, \check{V}_{RHV}}}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\check{l}_E}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} = \frac{K_{\Delta h, \check{V}_{RHV}}}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} \\
 &= \frac{K_{\Delta h, \check{V}_{RHV}}}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} = \frac{K_{\Delta h, \check{V}_{RHV}}}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\check{k}_f}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{h}_{Inf} = \frac{K_{\Delta h, \check{V}_{RHV}}}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} d\check{h}_{Inf} \\
 &= \frac{K_{\Delta h, \check{V}_{RHV}}}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{h}_{Inf} = K_{\Delta h, \check{V}_{RHV}} \times \frac{\check{h}_{Inf}}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} = K_{\Delta h, \check{V}_{RHV}} \times \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} = K_{\Delta h, \check{V}_{RHV}}
 \end{aligned}$$

Daraus kann geschlussfolgert werden, dass das Ergebnis des Mittelwertsatzes der Integralrechnung $\bar{y}_{\Delta h, \check{X}_n}$ dem Regressionskoeffizienten $K_{\Delta h, \check{X}_n}$ („Wirkstärke“) des linearen Terms des jeweils untersuchten Faktors entspricht (Gleichung 65). Dieser wiederum entspricht dem Ergebnis der partiellen Ableitung im Ursprung $(\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{X}_n} [0; 0; 0; 0])$, d. h. für den Fall, wenn für jeden Faktor der jeweilige optimale Wert verwendet wird.

$$\bar{y}_{\Delta h, \check{X}_n} = \frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{X}_n} (0; 0; 0; 0) = K_{\Delta h, \check{X}_n} \text{ des linearen Terms} \quad 65$$

Beispiel

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{V}_{\text{RHV}}}(0; 0; 0; 0) = K_{\Delta h, \text{RHV}} + (2 \times K_{\Delta h, \check{V}_{\text{RHV}}^2} \times 0) = K_{\Delta h, \text{RHV}} \quad (63)$$

Diese Schlussfolgerung ist gültig für

- multiple Beschreibungsmodelle mit Termen bis maximal des 2. Grades (z. B. $K_{\Delta h, \check{X}_n} \times \check{X}_n^2$ [parabolische Polynome]) und
- symmetrisch um den Nullpunkt festgelegte Intervalle (z. B. $-a < \check{X}_n < a$).

Davon abweichende Annahmen werden im Rahmen dieser Arbeit nicht bewertet.

7.2.5.4 Bergwerk Ibbenbüren

Die mittels der verwendeten Statistiksoftware ermittelten Wirkstärken ergeben für das Bergwerk Ibbenbüren das nachfolgende Beschreibungsmodell, das zur Beschreibung der Beziehung der vier untersuchten Faktoren und der Abweichung $y_{\Delta h}$ zwischen den Zeitreihen der berechneten und gemessenen Grubenwasser(druck)fläche dient (Gleichung 66; Abschnitt 7.2.4.1):

$$\begin{aligned} y_{\Delta h}(\check{V}_{\text{RHV}}; \check{l}_E; \check{k}_f; \check{h}_{\text{Inf}}) & \quad 66 \\ &= (0,35 \times \check{V}_{\text{RHV}}) + (-0,45 \times \check{l}_E) + (-0,10 \times \check{k}_f) \\ &+ (-0,32 \times \check{h}_{\text{Inf}}) + (1,46 \times \check{l}_E^2) + (-0,57 \times \check{k}_f^2) + (1,16 \times \check{h}_{\text{Inf}}^2) \\ &+ (-0,86 \times \check{V}_{\text{RHV}} \times \check{l}_E) + (-0,58 \times \check{V}_{\text{RHV}} \times \check{h}_{\text{Inf}}) \\ &+ (1,75 \times \check{l}_E \times \check{h}_{\text{Inf}}) + 1,57 \end{aligned}$$

Wird für jeden Faktor der jeweilige optimale Wert verwendet ($\check{X}_n = 0$), so verbleibt eine relative Abweichung von $\varepsilon = 1,57 \%$. Dieser Fehler ist der geringste Wert aller drei untersuchten Untertagebergwerke.

Das Beschreibungsmodell lässt sich nach den vier Faktoren partiell ableiten (Gleichung 67, Gleichung 70, Gleichung 73 und Gleichung 76). Aufgrund des Ausschlusses des nicht-signifikanten quadratischen Terms des Faktors „Resthohlraumvolumen“ ergibt die partielle Ableitung nach diesem Faktor eine Konstante, die dem Regressionskoeffizienten des linearen Terms entspricht (Gleichung 68; Abbildung 46). Die partiellen Ableitungen nach den anderen Faktoren sind lineare Funktionen, deren Ergebnis von dem Wert des jeweiligen untersuchten Faktors abhängt (Gleichung 71, Gleichung 74, Gleichung 77; Abbildung 46).

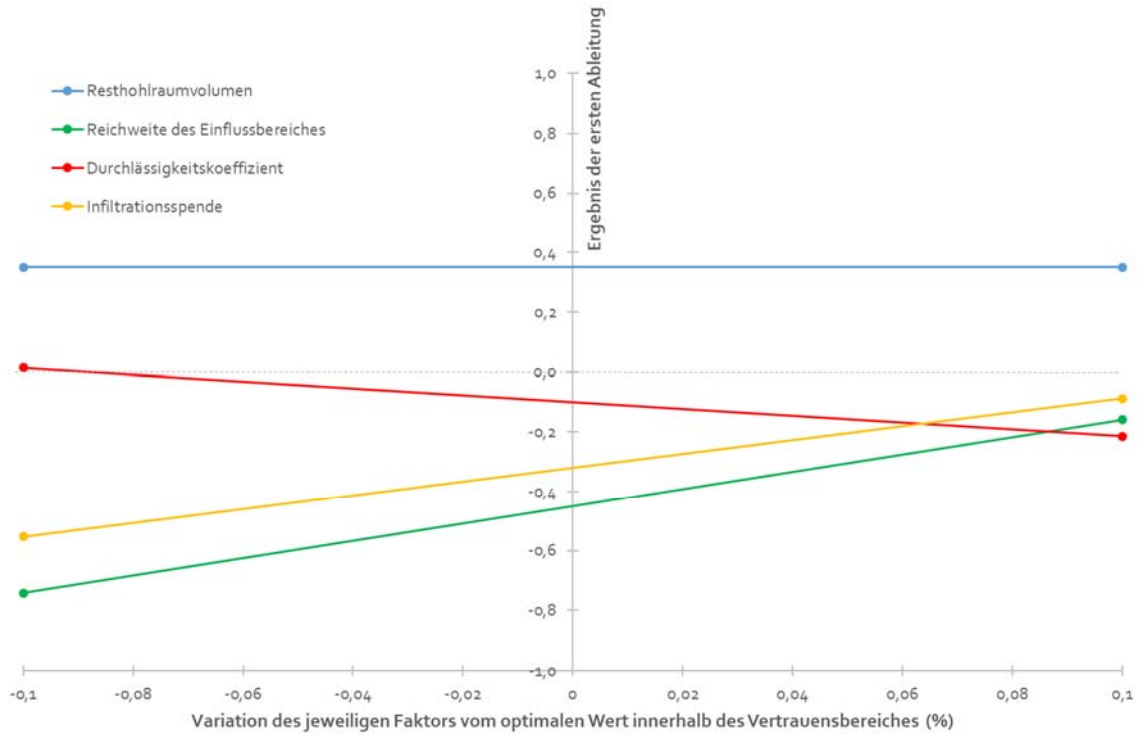


Abbildung 46: Graphische Darstellung der partiellen Ableitungsfunktionen innerhalb des Vertrauensbereichs $-0,1 < \check{X}_n < 0,1$ für das Bergwerk Ibbenbüren (Abbaubereich „Westfeld“).

Zur Bestimmung des singulären Einflusses eines Faktors werden die drei anderen Faktoren gleich Null gesetzt (d. h. Verwendung des jeweils optimalen Werts; Gleichung 71; Gleichung 74; Gleichung 77), wodurch die Wirkstärke sich lediglich in Abhängigkeit von der Variation des untersuchten Faktors ändert. Ebenso werden die Wirkstärken bestimmt, die sich ergeben, wenn für jeden Faktor der optimale Werte verwendet wird (Gleichung 72; Gleichung 75; Gleichung 78).

Partielle Ableitung nach dem Faktor „Resthohlraumvolumen“

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{V}_{RHH}}(\check{V}_{RHH}; \check{l}_E; \check{k}_f; \check{h}_{Inf}) = 0,35 + (-0,86 \times \check{l}_E) + (-0,58 \times \check{h}_{Inf}) \quad 67$$

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{V}_{RHH}}(\check{V}_{RHH}; 0; 0; 0) = 0,35 \quad 68$$

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{V}_{RHH}}(0; 0; 0; 0) = 0,35 \quad 69$$

Partielle Ableitung nach dem Faktor „**Reichweite des Einflussbereichs**“

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{l}_E}(\check{V}_{RHV}; \check{l}_E; \check{k}_f; \check{h}_{Inf}) = -0,45 + (2 \times 1,46 \times \check{l}_E) + (-0,86 \times \check{V}_{RHV}) + (1,75 \times \check{h}_{Inf}) \quad 70$$

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{l}_E}(0; \check{l}_E; 0; 0) = -0,45 + (2,92 \times \check{l}_E) \quad 71$$

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{l}_E}(0; 0; 0; 0) = -0,45 + (2,92 \times 0) = -0,45 \quad 72$$

Partielle Ableitung nach dem Faktor „**Durchlässigkeitskoeffizient**“

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{k}_f}(\check{V}_{RHV}; \check{l}_E; \check{k}_f; \check{h}_{Inf}) = -0,10 + (2 \times (-0,57) \times \check{k}_f) \quad 73$$

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{k}_f}(0; 0; \check{k}_f; 0) = -0,10 + (-1,14 \times \check{k}_f) \quad 74$$

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{k}_f}(0; 0; 0; 0) = -0,10 + (-1,14 \times 0) = -0,10 \quad 75$$

Partielle Ableitung nach dem Faktor „**Infiltrationsspende**“

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{h}_{Inf}}(\check{V}_{RHV}; \check{l}_E; \check{k}_f; \check{h}_{Inf}) = -0,32 + (2 \times 1,16 \times \check{h}_{Inf}) + (-0,58 \times \check{V}_{RHV}) + (1,75 \times \check{l}_E) \quad 76$$

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{h}_{Inf}}(0; 0; 0; \check{h}_{Inf}) = -0,32 + (2,32 \times \check{h}_{Inf}) \quad 77$$

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{h}_{Inf}}(0; 0; 0; 0) = -0,32 + (2,32 \times 0) = -0,32 \quad 78$$

Die Lösung der Mittelwertsätze der Integralrechnung über den Vertrauensbereich $(-0,1; 0,1)$ wird nachfolgend anhand des Faktors „Reichweite des Einflussbereichs“ exemplarisch dargestellt (Gleichung 79). Die Lösungswege zu den Mittelwertsätzen der Integralrechnung für die weiteren Faktoren sind im Anhang 13 zusammengestellt.

Die durchschnittlichen Funktionswerte entsprechen sowohl den Regressionskoeffizienten der linearen Terme der jeweiligen Faktoren (Tabelle 38) sowie den Ergebnissen der partiellen Ableitungen im Ursprung $(\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial X_n} [0; 0; 0; 0])$; Gleichung 69, Gleichung 72, Gleichung 75 und Gleichung 78). Somit werden die im Abschnitt 7.2.5.3 formulierten Schlussfolgerungen für das Bergwerk Ibbenbüren bestätigt.

$$\begin{aligned}
\bar{y}_{\Delta h, \check{l}_E}(\check{l}_E; \check{V}_{\text{RHHV}}; \check{k}_f; \check{h}_{\text{Inf}}) &= \frac{1}{0,2^4} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{l}_E} d\check{l}_E d\check{V}_{\text{RHHV}} d\check{k}_f d\check{h}_{\text{Inf}} \\
&= \frac{1}{0,2^4} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} -0,45 + (2 \times 1,46 \times \check{l}_E) d\check{l}_E d\check{V}_{\text{RHHV}} d\check{k}_f d\check{h}_{\text{Inf}} \\
&= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} -0,45 \times \check{l}_E \Big|_{-0,1}^{0,1} + \left(\frac{2,92}{2} \times \frac{\check{l}_E^2}{0,2} \right) \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{V}_{\text{RHHV}} d\check{k}_f d\check{h}_{\text{Inf}} \\
&= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} -0,45 \times \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} + (1,46 \\
&\quad \times \frac{0,1^2 - (-0,1)^2}{0,2}) d\check{V}_{\text{RHHV}} d\check{k}_f d\check{h}_{\text{Inf}} = \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} -0,45 d\check{V}_{\text{RHHV}} d\check{k}_f d\check{h}_{\text{Inf}} \\
&= -\frac{0,45}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{V}_{\text{RHHV}} d\check{k}_f d\check{h}_{\text{Inf}} = -\frac{0,45}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \check{V}_{\text{RHHV}} \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{k}_f d\check{h}_{\text{Inf}} \\
&= -\frac{0,45}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} d\check{k}_f d\check{h}_{\text{Inf}} \\
&= -\frac{0,45}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{k}_f d\check{h}_{\text{Inf}} = -\frac{0,45}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} \check{k}_f \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{h}_{\text{Inf}} \\
&= -\frac{0,45}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} d\check{h}_{\text{Inf}} = -\frac{0,45}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{h}_{\text{Inf}} = -0,45 \times \check{h}_{\text{Inf}} \Big|_{-0,1}^{0,1} \\
&= -0,45 \times \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} = -0,45
\end{aligned}$$

Tabelle 38: Gegenüberstellung der Regressionskoeffizienten („Wirkstärken“) der linearen Terme und der Ergebnisse der Mittelwertsätze der Integralrechnung für die untersuchten Faktoren des Bergwerks Ibbenbüren (Abbaubereich „Westfeld“).

Faktor	Regressionskoeffizient $K_{\Delta h}$ des linearen Terms	Mittelwertsatz der Integralrechnung $\bar{y}_{\Delta h}$
Resthohlraumvolumen	0,35	0,35
Reichweite des Einflussbereichs	-0,45	-0,45
Durchlässigkeitskoeffizient	-0,10	-0,10
Infiltrationsspende	-0,32	-0,32

7.2.5.5 Bergwerk Königsborn

Zur Beschreibung der Beziehung der vier untersuchten Faktoren und der Abweichung $y_{\Delta h}$ zwischen den Zeitreihen der berechneten und gemessenen Grubenwasser(druck)fläche für das Bergwerk Königsborn dient das folgende Beschreibungsmodell, das sich aus den mittels der verwendeten Statistiksoftware ermittelten Wirkstärken ergibt (Gleichung 80; Abschnitt 7.2.4.2):

$$\begin{aligned}
 y_{\Delta h}(\check{V}_{\text{RHV}}; \check{l}_E; \check{k}_f; \check{h}_{\text{Inf}}) &= (0,39 \times \check{V}_{\text{RHV}}) + (0,08 \times \check{l}_E) + (-0,21 \times \check{k}_f) + (0,18 \times \check{h}_{\text{Inf}}) \\
 &+ (2,73 \times \check{l}_E^2) + (-0,76 \times \check{k}_f^2) + (1,71 \times \check{h}_{\text{Inf}}^2) \\
 &+ (-1,29 \times \check{V}_{\text{RHV}} \times \check{l}_E) + (-0,68 \times \check{V}_{\text{RHV}} \times \check{k}_f) \\
 &+ (-1,05 \times \check{V}_{\text{RHV}} \times \check{h}_{\text{Inf}}) + (0,56 \times \check{l}_E \times \check{k}_f) + (2,42 \times \check{l}_E \times \check{h}_{\text{Inf}}) \\
 &+ (0,48 \times \check{k}_f \times \check{h}_{\text{Inf}}) + 2,46
 \end{aligned}
 \tag{80}$$

Wird für jeden Faktor der jeweilige optimale Wert verwendet ($\check{X}_n = 0$), so verbleibt eine relative Abweichung von $\varepsilon = 2,46 \%$, die höher als die des Bergwerks Ibbenbüren ist, allerdings geringer als die des Bergwerks Westfalen.

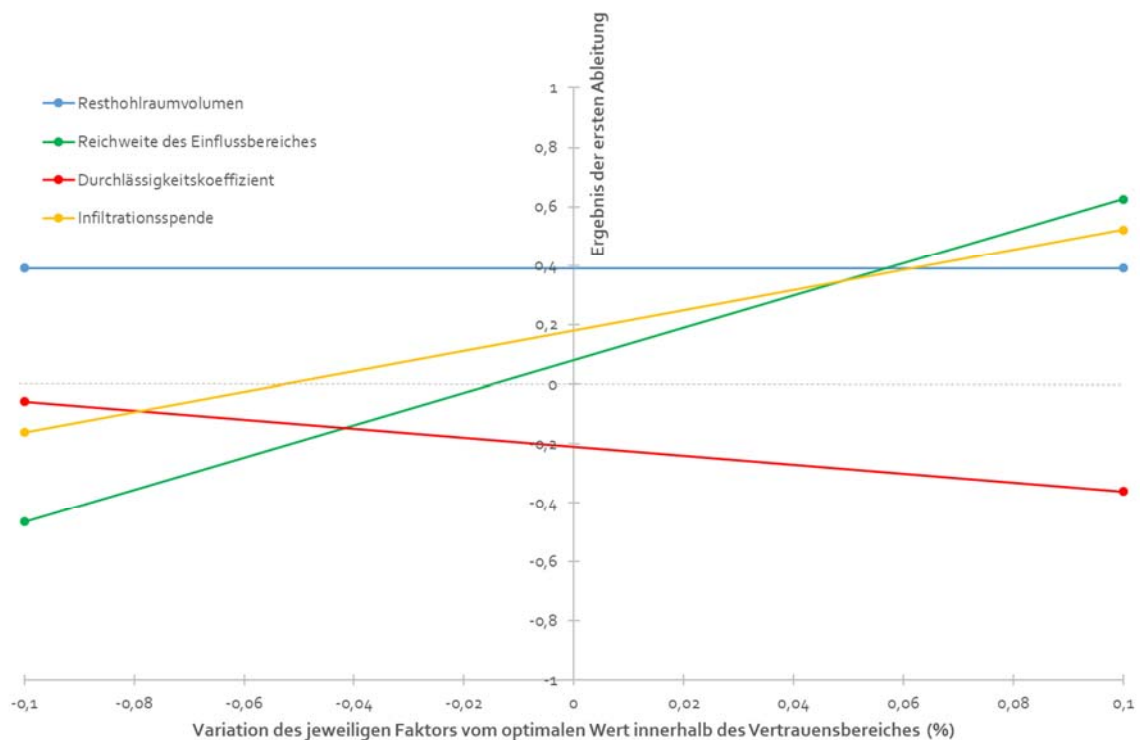


Abbildung 47: Graphische Darstellung der partiellen Ableitungsfunktionen innerhalb des Vertrauensbereichs $-0,1 < \check{X}_n < 0,1$ für das Bergwerk Königsborn.

Dieses Beschreibungsmodell lässt sich partiell nach jedem der vier untersuchten Faktoren ableiten (Gleichung 81; Gleichung 84; Gleichung 87; Gleichung 90). Wie beim Bergwerk

Ibbsbüren (Abschnitt 7.2.5.4) wird der quadratische Term des Faktors „Resthohlraumvolumen“ als nicht-signifikant gewertet, so dass die partielle Ableitung nach diesem Faktor eine Konstante ist (Gleichung 82; Abbildung 47). Die partiellen Ableitungen nach den anderen Faktoren sind hingegen lineare Funktionen, deren Ergebnis von den Werten der eingesetzten Faktoren bestimmt wird (Gleichung 85, Gleichung 88 und Gleichung 91; Abbildung 47).

Durch Konstant halten von drei Faktoren in Höhe der jeweiligen optimalen Werte wird der singuläre Einfluss eines Faktors durch dessen Variation bestimmt (Gleichung 85, Gleichung 88 und Gleichung 91; Abbildung 47). Werden für alle Faktoren der jeweilige optimale Wert verwendet, so entspricht die Wirkstärke dem Regressionskoeffizienten des linearen Terms (Gleichung 83, Gleichung 86, Gleichung 89 und Gleichung 92).

Partielle Ableitung nach dem Faktor „**Resthohlraumvolumen**“

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{V}_{RHH}}(\check{V}_{RHH}; \check{l}_E; \check{k}_f; \check{h}_{Inf}) = 0,39 + (-1,29 \times \check{l}_E) + (-0,68 \times \check{k}_f) + (-1,05 \times \check{h}_{Inf}) \quad 81$$

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{V}_{RHH}}(\check{V}_{RHH}; 0; 0; 0) = 0,39 \quad 82$$

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{V}_{RHH}}(0; 0; 0; 0) = 0,39 \quad 83$$

Partielle Ableitung nach dem Faktor „**Reichweite des Einflussbereichs**“

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{l}_E}(\check{V}_{RHH}; \check{l}_E; \check{k}_f; \check{h}_{Inf}) = 0,08 + (2 \times 2,73 \times \check{l}_E) + (-1,29 \times \check{V}_{RHH}) + (0,56 \times \check{k}_f) + (2,42 \times \check{h}_{Inf}) \quad 84$$

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{l}_E}(0; \check{l}_E; 0; 0) = 0,08 + (5,46 \times \check{l}_E) \quad 85$$

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{l}_E}(0; 0; 0; 0) = 0,08 + (5,46 \times 0) = 0,08 \quad 86$$

Partielle Ableitung nach dem Faktor „**Durchlässigkeitskoeffizient**“

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{k}_f}(\check{V}_{RHH}; \check{l}_E; \check{k}_f; \check{h}_{Inf}) = -0,21 + (2 \times (-0,76) \times \check{k}_f) + (-0,68 \times \check{V}_{RHH}) + (0,56 \times \check{l}_E) + (0,48 \times \check{h}_{Inf}) \quad 87$$

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{k}_f}(0; 0; \check{k}_f; 0) = -0,21 + (-1,52 \times \check{k}_f) \quad 88$$

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{k}_f}(0; 0; 0; 0) = -0,21 + (-1,52 \times 0) = -0,21 \quad 89$$

Partielle Ableitung nach dem Faktor „Infiltrationsspende“

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{h}_{\text{Inf}}}(\check{V}_{\text{RHV}}; \check{l}_{\text{E}}; \check{k}_{\text{f}}; \check{h}_{\text{Inf}}) = 0,18 + (2 \times 1,71 \times \check{h}_{\text{Inf}}) + (-1,05 \times \check{V}_{\text{RHV}}) + (2,42 \times \check{l}_{\text{E}}) + (0,48 \times \check{k}_{\text{f}}) \quad 90$$

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{h}_{\text{Inf}}}(0; 0; 0; \check{h}_{\text{Inf}}) = 0,18 + (3,42 \times \check{h}_{\text{Inf}}) \quad 91$$

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{h}_{\text{Inf}}}(0; 0; 0; 0) = 0,18 + (3,42 \times 0) = 0,18 \quad 92$$

Tabelle 39: Gegenüberstellung der Regressionskoeffizienten („Wirkstärken“) der linearen Terme und der Ergebnisse der Mittelwertsätze der Integralrechnung für die untersuchten Faktoren des Bergwerks Königsborn.

Faktor	Regressionskoeffizient $K_{\Delta h}$ des linearen Terms	Mittelwertsatz der Integralrechnung $\bar{y}_{\Delta h}$
Resthohlraumvolumen	0,39	0,39
Reichweite des Einflussbereichs	0,08	0,08
Durchlässigkeitskoeffizient	−0,21	−0,21
Infiltrationsspende	0,18	0,18

Die Lösungswege zu den Mittelwertsätzen der Integralrechnung, die der Bestimmung der durchschnittlichen Wirkstärken innerhalb des Vertrauensbereichs dient, sind im Anhang 13 zusammengefasst. Die Ergebnisse entsprechen allesamt den Regressionskoeffizienten der linearen Terme der jeweiligen Faktoren (Tabelle 39), so dass die im Abschnitt 7.2.5.3 formulierte Schlussfolgerung ebenfalls für das Bergwerk Königsborn gültig ist.

7.2.5.6 Bergwerk Westfalen

Um die Beziehung der vier untersuchten Faktoren und der Abweichung $y_{\Delta h}$ zwischen den Zeitreihen der berechneten und gemessenen Grubenwasser(druck)fläche für das Bergwerk Westfalen zu beschreiben, wird das nachfolgende Beschreibungsmodell verwendet (Gleichung 93):

$$\begin{aligned}
 y_{\Delta h}(\check{V}_{RHV}; \check{l}_E; \check{k}_f; \check{h}_{Inf}) &= (0,08 \times \check{V}_{RHV}) + (-0,25 \times \check{l}_E) + (-0,28 \times \check{k}_f) + (-0,09 \times \check{h}_{Inf}) \\
 &+ (3,36 \times \check{V}_{RHV}^2) + (-1,42 \times \check{l}_E^2) + (2,66 \times \check{k}_f^2) \\
 &+ (-4,21 \times \check{V}_{RHV} \times \check{k}_f) + (-1,61 \times \check{V}_{RHV} \times \check{h}_{Inf}) \\
 &+ (0,97 \times \check{k}_f \times \check{h}_{Inf}) + 3,50
 \end{aligned}
 \tag{93}$$

Wird für jeden Faktor der jeweilige optimale Wert verwendet ($\check{X}_n = 0$), so verbleibt eine relative Abweichung von $\varepsilon = 3,50 \%$. Dieser Fehler ist der höchste Wert aller drei untersuchten Untertagebergwerke, der allerdings für eine gute Beschreibung der Grubenwasser(druck)fläche tolerierbar ist.

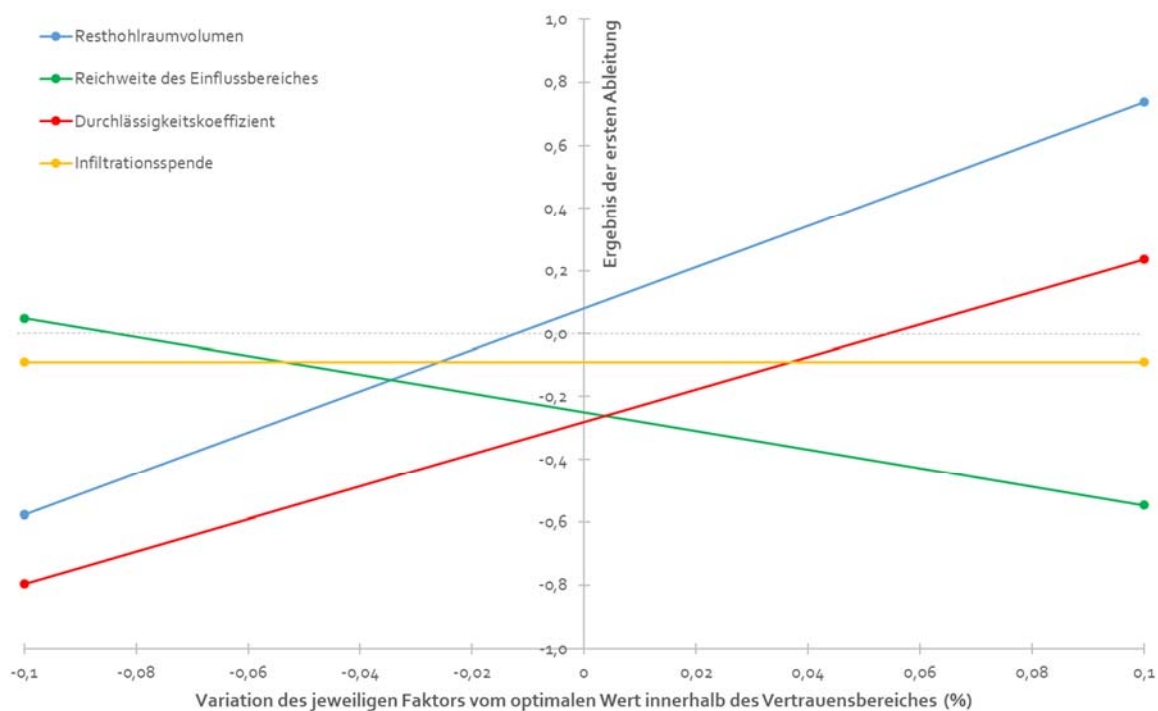


Abbildung 48: Graphische Darstellung der partiellen Ableitungsfunktionen innerhalb des Vertrauensbereichs $-0,1 < \check{X}_n < 0,1$ für das Bergwerk Westfalen.

Für die Bewertung des singulären Einflusses eines Faktors auf die Veränderung der Grubenwasser(druck)fläche werden die partiellen Ableitungen nach den jeweiligen Faktoren gebildet (Gleichung 94; Gleichung 97; Gleichung 100; Gleichung 103), in denen dann

für die drei Faktoren der optimale Wert ($\check{X}_n=0$) eingesetzt werden, nach denen nicht abgeleitet wird (Gleichung 95, Gleichung 98, Gleichung 101 und Gleichung 104). Da der quadratische Term des Faktors „Infiltrationsspende“ nicht-signifikant ist, ist das Ergebnis der partiellen Ableitung nach diesem Faktor eine Konstante (Gleichung 104; Abbildung 48). Die übrigen partiellen Ableitungen sind lineare Funktionen, deren Ergebnis vom eingesetzten Wert des jeweils untersuchten Faktors abhängt (Gleichung 95, Gleichung 98 und Gleichung 101; Abbildung 48). Die Wirkstärken der optimalen Variante ergeben sich, wenn für jeden Faktor der jeweilige optimale Wert berücksichtigt wird (Gleichung 96, Gleichung 99, Gleichung 102 und Gleichung 105).

Partielle Ableitung nach dem Faktor „**Resthohlraumvolumen**“

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{V}_{RHH}}(\check{V}_{RHH}; \check{l}_E; \check{k}_f; \check{h}_{Inf}) = 0,08 + (2 \times 3,29 \times \check{V}_{RHH}) + (-4,21 \times \check{k}_f) + (-1,61 \times \check{h}_{Inf}) \quad 94$$

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{V}_{RHH}}(\check{V}_{RHH}; 0; 0; 0) = 0,08 + (6,58 \times \check{V}_{RHH}) \quad 95$$

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{V}_{RHH}}(0; 0; 0; 0) = 0,08 + (6,58 \times 0) = 0,08 \quad 96$$

Partielle Ableitung nach dem Faktor „**Reichweite des Einflussbereichs**“

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{l}_E}(\check{V}_{RHH}; \check{l}_E; \check{k}_f; \check{h}_{Inf}) = -0,25 + (2 \times (-1,42) \times \check{l}_E) \quad 97$$

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{l}_E}(0; \check{l}_E; 0; 0) = -0,25 + (-2,84 \times \check{l}_E) \quad 98$$

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{l}_E}(0; 0; 0; 0) = -0,25 + (-2,84 \times 0) = -0,25 \quad 99$$

Partielle Ableitung nach dem Faktor „**Durchlässigkeitskoeffizient**“

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{k}_f}(\check{V}_{RHH}; \check{l}_E; \check{k}_f; \check{h}_{Inf}) = -0,28 + (2 \times 2,66 \times \check{k}_f) + (-4,21 \times \check{V}_{RHH}) + (0,97 \times \check{h}_{Inf}) \quad 100$$

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{k}_f}(0; 0; \check{k}_f; 0) = -0,28 + (5,32 \times \check{k}_f) \quad 101$$

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{k}_f}(0; 0; 0; 0) = -0,28 + (5,32 \times 0) = -0,28 \quad 102$$

Partielle Ableitung nach dem Faktor „Infiltrationsspende“

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{h}_{\text{Inf}}}(\check{V}_{\text{RHV}}; \check{l}_E; \check{k}_f; \check{h}_{\text{Inf}}) = -0,09 + (-1,61 \times \check{V}_{\text{RHV}}) + (0,97 \times \check{k}_f) \quad 103$$

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{h}_{\text{Inf}}}(0; 0; 0; \check{h}_{\text{Inf}}) = -0,09 \quad 104$$

$$\frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{h}_{\text{Inf}}}(0; 0; 0; 0) = -0,09 \quad 105$$

Die Lösungswege zu den Mittelwertsätzen der Integralrechnung, die der Bestimmung der durchschnittlichen Wirkstärken innerhalb des Vertrauensbereichs dient, sind im Anhang 13 zusammengefasst. Die Ergebnisse entsprechen allesamt den Regressionskoeffizienten der linearen Terme der jeweiligen Faktoren (Tabelle 40), so dass die im Abschnitt 7.2.5.3 formulierte Schlussfolgerung ebenfalls für das Bergwerk Westfalen gültig ist.

Tabelle 40: Gegenüberstellung der Regressionskoeffizienten („Wirkstärken“) der linearen Terme und der Ergebnisse der Mittelwertsätze der Integralrechnung für die untersuchten Faktoren des Bergwerks Westfalen.

Faktor	Regressionskoeffizient $K_{\Delta h}$ des linearen Terms	Mittelwertsatz der Integralrechnung $\bar{y}_{\Delta h}$
Resthohlraumvolumen	0,08	0,08
Reichweite des Einflussbereichs	-0,25	-0,25
Durchlässigkeitskoeffizient	-0,28	-0,28
Infiltrationsspende	-0,09	-0,09

8 Bewertung und Diskussion der Ergebnisse

Aufbau und Anwendung von Modellen

Modelle stellen den Ablauf von Prozessen dar und ermöglichen oftmals erst deren Untersuchung. Sie dienen dazu, das Verständnis über diese Prozesse zu vertiefen. Da Modelle vereinfachte Abbildungen der komplexen Natur darstellen, können Modelle die Natur nie im Ganzen abdecken. Einige Eigenschaften werden je nach Fragestellung und Zielrichtung durch ein Modell realitätsnah dargestellt. Andere eher unwichtigere Aspekte werden hingegen simplifiziert oder gar außer Acht gelassen. Modelle sind daher nicht richtig oder falsch, sondern dienen als Werkzeug für einen bestimmten Zweck. Dazu gehört beispielsweise die Untersuchung möglicher Wirkungszusammenhänge zwischen den Modelleingangsdaten (Faktoren) und den Zielgrößen (Effekte).

Das eigens im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelte analytische Modell erweist sich als ein geeignetes Werkzeug für die Modellierung der zeitlichen Verläufe der Grubenwasser(druck)fläche und der Zuflussrate in Untertagebergwerken. Gegenüber komplexer aufgebauten numerischen Modellen (z. B. MODFLOW, FEFLOW, Spring, Volumenbilanzmodelle) setzt das analytische Modell eine weniger umfangreiche Kenntnis über die räumliche Verteilung hydrogeologischer und bergbaulicher Faktoren voraus. Stattdessen simplifiziert das analytische Modell die Natur dahingehend, dass die Lagerstätte lediglich vertikal in einheitliche, voneinander abgrenzbare Schichten eingeteilt wird. In horizontaler Richtung, d. h. innerhalb dieser einheitlichen Schichten, sind die Modelleingangsdaten homogen verteilt. Der vereinfachte Modellaufbau eignet sich besonders für Untertagebergwerke, die überwiegend hydraulisch isoliert von benachbarten Untertagebergwerken sind. Wie das Beispiel des Bergwerks Königsborn zeigt, können allerdings einzelne flächenhafte Abflüsse in benachbarte Untertagebergwerke (in diesem Fall über die durchlässigen Schichten des Turoniums und Cenomaniums) bilanziert werden. Eine Anwendung in weit ausgedehnten, bergbaulich intensiv überprägten Gebieten mit einer Vielzahl hydraulisch untereinander zusammenhängender Untertagebergwerke ist im Rahmen dieser Arbeit nicht geprüft worden. Für solche Untersuchungsgebiete haben sich die Volumenbilanzmodelle (z. B. Boxmodell, GRAM-Modell) in den vergangenen rd. zwei Jahrzehnten bewährt.

Im analytischen Modell wird angenommen, dass die Schichten annähernd sählig abgelagert sind. Geringes Schichteinfallen (< 5 Grad), wie es für die geologischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet der Fall ist, kann das analytische Modell abbilden. Ob das analytische Modell allerdings für komplexer aufgebaute geologische und tektonische Verhältnissen anwendbar ist, bedarf einer weiteren Untersuchung. Die Prüfung dieser Anwendbarkeit ist jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit. Größere Komplexitäten können sicherlich

durch numerische Modelle aufgrund deren höheren Flexibilität im Modellaufbau besser abgebildet werden.

Modelleingangsdaten

Ein Grundsatz der Modellierung lautet, dass das Modellergebnis immer nur so gut ist wie die verwendeten Modelleingangsdaten (Faktoren). Sind diese ungenau oder gar fehlerhaft, so sind folglich auch die Ergebnisse des Modells nicht korrekt. Aber vor allem in hydrogeologisch und bergbaulich komplex aufgebauten Lagerstätten variieren die Untergrundeigenschaften auf engstem Raum zum Teil sehr stark. Die Daten liegen allerdings oftmals nicht in dem erforderlichen Umfang und der notwendigen Qualität vor. In der Regel können die fehlenden Daten dann nur mit einem größeren finanziellen und methodischen Aufwand erhoben werden.

Zwei im Rahmen dieser Arbeit modelltechnisch untersuchte Faktoren – die flächenspezifische vertikale Infiltrationsspende und die Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs – sind messtechnisch schwer zu quantifizieren. Die gewählten rechnerischen Ansätze zur Bestimmung dieser beiden Modelleingangsdaten basieren auf den grundlegenden Gleichungen und Annahmen der Grundwasserdynamik. Die ermittelten Daten werden im analytischen Modell verwendet und belegen, dass mit diesen eine gute Übereinstimmung der Modell- und Messwerte erzielt wird. Diese Beobachtung weist darauf hin, dass die Resultate der rechnerischen Ansätze den tatsächlichen Gegebenheiten annähernd entsprechen. In diesen Gleichungen sind Faktoren enthalten, die auf Annahmen basieren und somit mit Unsicherheiten führen, die jedoch zu tolerieren sind.

Andere Daten unterliegen gebirgsmechanischen Prozessen. Dazu gehört das dauerhaft verbleibende und für die Wasseraufnahme zur Verfügung stehende bergbaulich geschaffene Hohlraumvolumen. Während die Geometrie des offenen Grubengebäudes in Zeiten der aktiven Gewinnung noch messbar ist, sind die Folgen von Konvergenzerscheinungen, die mit der Zeit das Volumen des offenen Grubengebäudes reduzieren, nur mit Unsicherheiten und Annahmen abzuschätzen.

Die berechneten Daten beruhen folglich auf Annahmen und sind stets kritisch zu bewerten. Anstelle von festen Werten sind daher Wertespannbreiten für die Modelleingangsdaten zu definieren. Diese sollten den begründbaren Vertrauensbereich eines Faktors abdecken. Damit werden unsicheren und unvollständigen Daten und deren möglicherweise fehlerbehaftete Erhebung Rechnung getragen. Der Festlegung der unteren und oberen Stufe der Wertespannbreite kommt dabei eine große Bedeutung zu: ist die Wertespannbreite zu klein gewählt, können die Auswirkungen zu gering ausgeprägt sein, um diese überhaupt nachzuweisen. Ist hingegen die Wertespannbreite zu groß gewählt, können die Auswirkungen unverhältnismäßig stark ausgebildet sein. Der im Rahmen dieser Arbeit festgelegte Vertrauensbereich von $\pm 10\%$ um einen Erwartungswert hat sich aus Sicht des

Verfassers bewährt. Die einheitliche Wertespannbreite für jeden untersuchten Faktor gewährleistet, dass die resultierenden Abweichungen vergleichbar sind.

Modellergebnisse

Zu Beginn jeder Untersuchung ist oftmals wenig über die Modelleingangsdaten (Faktoren) und den Zielgrößen (Effekte) bekannt. Ziel dieser Arbeit ist es, anhand der Modellergebnisse die faktorspezifische Sensitivität des analytischen Modells zu bewerten. Dadurch werden Rückschlüsse über die Einflussnahme eines Faktors auf den Grubenwasseranstieg gezogen. Durch das durchgeführte Screening-Verfahren ist nun die Höhe der Einflussnahme von vier ausgewählten Faktoren bestimmt. Ein hoher Einfluss spiegelt sich dabei in einer erkennbaren Veränderung des Ist-Zustands (hier: tatsächliche Messkurve) durch die Variation eines Faktors wider. Die Veränderungen werden anhand der berechneten Modellkurven angezeigt.

Zielgrößen der vorgenommenen Modellierung sind die zeitlichen Entwicklungen der Grubenwasser(druck)fläche und der Zuflussrate. Die Zeitreihe der gemessenen Grubenwasser(druck)fläche setzt sich aus einer Vielzahl von Einzelmessungen zusammen, so dass eine ausreichende Datengrundlage für eine belastbare Vergleichbarkeit dieser Messwerte mit den berechneten Modellwerten vorliegt. Die Entwicklung der Zuflussrate indes beruht lediglich auf einem Messwert vor Beginn des Grubenwasseranstiegs. Danach sind Messungen nicht mehr möglich, da das Grubengebäude nicht mehr zugänglich ist. Die Entwicklung der Zuflussrate während eines Grubenwasseranstiegs beruht daher auf einer Wasserbilanzrechnung. Aufgrund der fehlenden Datengrundlage ist eine fundierte statistische Auswertung oder gar eine begründbare Bewertung der Wirkstärken von Faktoren auf diesen Prozess nicht möglich. Im Rahmen der Arbeit wird daher auf die statistische Aus- und Bewertung der Zuflussrate verzichtet. Sollte allerdings die Aufzeichnung der Zuflussrate zukünftig möglich sein oder umgesetzt werden, so wäre die statistische Bewertung analog zu der im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Methodik von Interesse, um das Verständnis über diesen, bislang nur auf Grundlage von Modellierungen bilanzierten Prozess zu vertiefen.

Statistische Auswertung

Modellergebnisse sind statistisch auszuwerten, um Zusammenhänge zwischen den Modelleingangsdaten (Faktoren) und Zielgrößen (Effekte) zu identifizieren. In statistischen Verfahren wie OFAT (One Factor at A Time) oder COST (Change One Setting at a Time) wird der Einfluss eines Faktors unter stationären Rahmenbedingungen untersucht, indem nur ein Faktor variiert wird. Die anderen Faktoren werden hingegen nicht verändert. Dadurch kann der Einfluss eines Faktors über die gesamte Wertespannbreite nicht unabhängig von den anderen Faktoren untersucht werden. Wechselwirkungen zwischen den

Faktoren werden vernachlässigt. In der statistischen Versuchsplanung (Design of Experiments) werden hingegen sämtliche Faktoren systematisch und gleichzeitig variiert. Dieser Ansatz ermöglicht, den Einfluss eines Faktors unabhängig von den anderen Faktoren über die gesamte Wertespannbreite zu bestimmen. In vielen Bereichen der Entwicklung und Optimierung hat sich diese mathematische Methode bislang etabliert. Diese Arbeit belegt nun eine erstmalige Anwendung im Bereich der speziellen Hydrogeologie im (Nach-)Bergbau. Die statistische Versuchsplanung erweist sich als eine effiziente und standardisierte Methode, ein multifaktorielles System, wie das eines Grubenwasseranstiegs in einem Untertagebergwerk, mit einem reduzierten Versuchsaufwand systematisch zu analysieren. Ein Maximum an Erkenntnissen über die Einflussnahme vieler Faktoren auf die Zielgrößen kann damit erlangt werden.

Ein Ursache-Wirkungs-Modell stellt den funktionalen Zusammenhang zwischen der Variation eines untersuchten Faktors und der Auswirkung auf die Zielgröße dar. In der vorliegenden Untersuchung wird dieser funktionale Zusammenhang von einem nicht-linearen, multiplen Beschreibungsmodell beschrieben. Mittels dieser Gleichung lässt sich die Abweichung zwischen den Zeitreihen der berechneten und gemessenen Grubenwasser(druck)fläche bei unterschiedlichen Faktorenkombinationen berechnen. Hohe R^2 -Werte zwischen 0,95 und 0,99 sowie hohe Q^2 -Werte zwischen 0,75 und 0,98 belegen eine sehr gute Modellgüte. Das analytische Modell eignet sich daher, einerseits den bisherigen Grubenwasseranstiegsverlauf zutreffend zu beschreiben und andererseits Prognosen für einen zukünftigen Verlauf auf Basis der vorhandenen Datengrundlage zu treffen. Während die Beschreibung die retrospektive Betrachtung durch eine gute Deckungsgleichheit der berechneten und gemessenen Kurven bestätigt ist, ist die prospektive Anwendung des analytischen Modells im Rahmen dieser Arbeit nicht getestet worden.

Das Beschreibungsmodell wird durch die verwendete Statistiksoftware berechnet. Diese ist eine Annäherung an die tatsächliche Abweichung zwischen den Zeitreihen der berechneten und gemessenen Grubenwasser(druck)höhe. Fehlerkonstanten zwischen 1,57 % und 3,50 % quantifizieren den verbleibenden Fehler, der den Teil des zu beschreibenden Prozesses darstellt, der nicht durch das gewählte Beschreibungsmodell erklärt werden kann. Diese Fehler sind gering und liegen in einem tolerierbaren Bereich, der eine ausreichende Beschreibung des Grubenwasseranstiegs erlaubt.

Die Wirkstärken der Faktoren liegen in dem Beschreibungsmodell in Form linearer, quadratischer und wechselwirkender Terme vor. Im Sinne des praktischen Nutzens ist allerdings die Kenntnis über die Höhe der singulären Einflussnahme eines Faktors von Interesse. Mit der partiellen Ableitung des Beschreibungsmodells nach jedem der vier untersuchten Faktoren wird ein mathematisches Verfahren gewählt, das die Veränderung der

Zielgröße durch die Variation eines Faktors angibt. Es handelt sich dabei um ein Verfahren, das schnell und einfach angewendet und nachvollzogen werden kann. Das Ergebnis belegt, dass die Wirkstärke eines Faktors dem Regressionskoeffizienten des jeweiligen linearen Terms entspricht. Diese Übereinstimmung wird durch die Wahl des untersuchten, symmetrisch um den Nullpunkt angeordneten Vertrauensbereichs für jeden Faktor $(-0,1; 0,1)$ vorgegeben. Die Integration, mittels der der mittlere Funktionswert über den Vertrauensbereich bestimmt wird, führt nämlich dazu, dass sich die Funktionswerte im negativen Bereich $(-0,1 - \check{X}_n - 0)$ durch die Funktionswerte im positiven Bereich $(0 - \check{X}_n - 0,1)$ aufheben. Eine Abweichung des Vertrauensbereichs von diesem symmetrisch um den Nullpunkt angelegten Intervall führt zu anderen mittleren Wirkstärken. Auch wenn dieser festgelegte Vertrauensbereich den rechnerischen Ansatz vereinfacht, ist es zielführend, die mittlere Wirkstärke über den gesamten Vertrauensbereich zu bestimmen. Damit wird den von der Natur aus unsicheren und ungenauen Modelleingangsdaten Rechnung getragen.

Übertragung auf die Natur

Die ermittelten Wirkstärken sind standortspezifisch. Die Ergebnisse lassen sich allerdings verallgemeinern und auf die Natur übertragen, indem die Wirkstärken mit den charakteristischen hydrogeologischen Eigenschaften der Lagerstätten verglichen werden. Dazu zählen beispielsweise:

1. Mächtigkeit des Deckgebirges $h_{M,DG}$ (m),
2. Gesamtteufe eines Untertagebergwerks $h_{M,GT}$ (m),
(Anm.: entspricht der Teufe des Schachts, in dem die Grubenwasser(druck)fläche gemessen wird.)
3. vertikale Zuflussrate (Infiltrationsrate) aus dem Hangenden \dot{V}_{Inf} (m³/d),
4. horizontale Zuflussrate von Tiefenwasser \dot{V}_{Tw} (m³/d).

Diese Eigenschaften werden in Verhältnisse zueinander gesetzt (1+2 sowie 3+4), wodurch Faktoren als Größen der Dimension Eins (dimensionslos; DIN EN ISO 80000-1 2013) gebildet werden. Der dimensionslose Faktor $\xi = \frac{h_{M,DG}}{h_{M,GT}}$ beschreibt das Verhältnis zwischen der Deckgebirgsmächtigkeit und der Gesamtteufe eines Untertagebergwerks und berücksichtigt demnach den Einfluss des Deckgebirges auf den Grubenwasseranstieg. Deckgebirgsfreie Lagerstätten sind durch geringe Verhältnisse (ξ nahe 0) gekennzeichnet (z. B. Bergwerk Ibbenbüren; linke Seite in der Abbildung 49). Lagerstätten mit hohen Deckgebirgsmächtigkeiten weisen hingegen höhere Verhältnisse auf ($\xi > 0,5$; z. B. Bergwerk Westfalen; rechte Seite in der Abbildung 49; Tabelle 41).

Tabelle 41: Verhältnis zwischen der Deckgebirgsmächtigkeit (Summe aus Emscher-Formation und Schichten des Turoniums und Cenomaniums) und der Gesamtteufe eines Untertagebergwerks.

	Bergwerk Ibbenbüren	Bergwerk Königsborn	Bergwerk Westfalen
Deckgebirgsmächtigkeit $h_{M,DG}$ (m)	5	297	799
Gesamtteufe $h_{M,GT}$ (m)	505	1.006	1.330
Verhältnis $\xi = \frac{h_{M,DG}}{h_{M,GT}}$ (1)	0,01	0,30	0,60

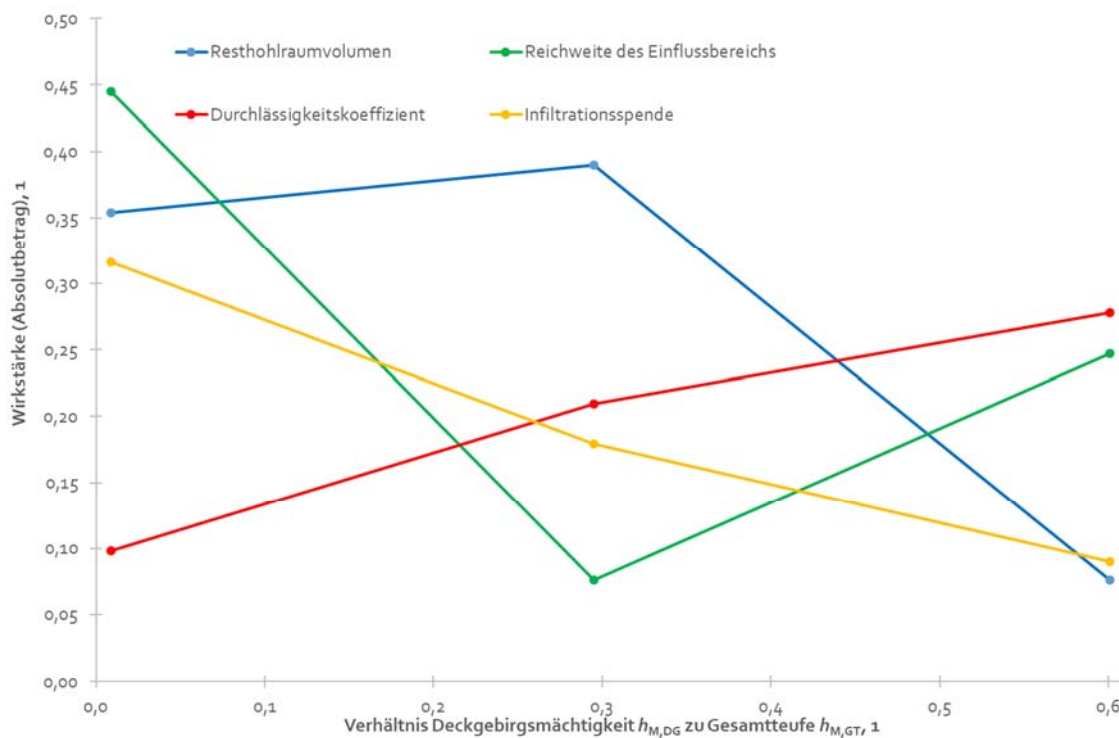


Abbildung 49: Wirkstärken in Abhängigkeit von dem Verhältnis zwischen der Deckgebirgsmächtigkeit und der Gesamtteufe eines Untertagebergwerks.

Werden die standortspezifischen Wirkstärken gegen diese dimensionslose Lagerstättencharakteristik aufgetragen, so lassen sich eindeutige Trends für die Faktoren in Abhängigkeit von der Deckgebirgsmächtigkeit erkennen (Abbildung 49). Die Wirkstärken der Faktoren „Infiltrationsspende“, „Reichweite des Einflussbereichs“ und „Resthohlraumvolumen“ nehmen mit zunehmender Deckgebirgsmächtigkeit (in Bezug zur Gesamtteufe) ab. Die Wirkstärke für den Faktor „Infiltrationsspende“ nimmt dabei streng monoton ab.

Es gilt somit, dass der Einfluss dieses Faktors auf die Grubenwasser(druck)höhe umso geringer wird, desto mächtiger das ([sehr] schwach durchlässige) Deckgebirge ausgebildet ist.

Die abfallende Entwicklung der Wirkstärken der beiden anderen (anthropogenen) Faktoren – Reichweite des Einflussbereichs und Resthohlraumvolumen – wird hingegen durch das Bergwerk Königsborn unterbrochen. Vor allem die hohe Wirkstärke des Faktors „Resthohlraumvolumen“ wird in diesem Vergleich deutlich (Abbildung 49). Dieses ist möglicherweise dadurch begründet, dass das Bergwerk Königsborn den höchsten Durchbauungsgrad aller untersuchten Untertagebergwerke aufweist (Tabelle 42). Der Durchbauungsgrad eines Untertagebergwerks ist wie folgt definiert (Gleichung 106):

$$n_{DB} = \frac{V_{RHH}}{A_{U,Abbau}} \quad 106$$

mit

$$\begin{aligned} n_{DB} &= \text{Durchbauungsgrad eines Untertagebergwerks } \left(\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2}\right), \\ V_{RHH} &= \text{bergmännisch geschaffenes Resthohlraumvolumen (m}^3\text{),} \\ A_{U,Abbau} &= \text{Fläche der umhüllenden Abbaufäche (m}^2\text{).} \end{aligned}$$

Die Verhältnisse der Resthohlraumvolumina zu den dazugehörigen Flächen der umhüllenden Abbaufächen belegen, dass der Durchbauungsgrad des Bergwerks Königsborn ($0,91 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2}$) im Vergleich zum Bergwerk Westfalen ($0,64 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2}$; mit einem vergleichbaren Resthohlraumvolumen, jedoch größeren Abbaufäche) um $\frac{1}{3}$ höher und im Vergleich zum Bergwerk Ibbenbüren ($0,33 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2}$; geringeres Resthohlraumvolumen bei größerer Abbaufäche) gar um $\frac{2}{3}$ größer ist (Tabelle 42).

Tabelle 42: Abschätzung des Durchbauungsgrades.

	Bergwerk Ibbenbüren	Bergwerk Königsborn	Bergwerk Westfalen
Resthohlraumvolumen, m ³	5.536.743	10.087.782	10.191.433
Fläche der umhüllenden Abbaufäche, m ²	16.810.950	11.030.000	15.973.994
Durchbauungsgrad, $\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2}$	0,33	0,91	0,64

Die abfallende Entwicklung dieser beiden anthropogenen Faktoren kann jedoch nicht begründet werden. Beide Faktoren beschreiben die geometrischen Eigenschaften einer La-

gerstätte im Hinblick auf dessen laterale Ausdehnung und das untertägige Hohlraumvolumen und sind daher von geologischen (z. B. Deckgebirgsmächtigkeit) wie auch von klimatischen Faktoren (z. B. Grund-/Grubenwasserneubildungsrate) unabhängig.

Demgegenüber steigt die Kurve der Wirkstärke des Faktors „Durchlässigkeitskoeffizient“ monoton an, je größer das Verhältnis zwischen der Deckgebirgsmächtigkeit und der Gesamtteufe wird. Diese Entwicklung unterstreicht die zunehmende Einflussnahme der hydraulischen Gebirgsdurchlässigkeit für Lagerstätten, deren Deckgebirge im Zuge des Grubenwasseranstiegs durchströmt wird, sobald das offene Grubengebäude überstaut ist. In diesen Fällen beeinflusst die Beschaffenheit des Deckgebirges (wozu die hydraulische Durchlässigkeit zählt) maßgeblich den Verlauf des Grubenwasseranstiegs. Die Zunahme der Anstiegsgeschwindigkeiten in den Bergwerken Königsborn und Westfalen mit Erreichen der Basis des Deckgebirges belegen diese Einflussnahme. In deckgebirgsfreien Lagerstätten, wie z. B. das Bergwerk Ibbenbüren, hingegen steigt das Grubenwasser vor allem im offenen Grubengebäude an, weshalb der Einfluss der hydraulischen Gebirgsdurchlässigkeit hier eine weniger bedeutsame Rolle spielt.

Das Verhältnis $\eta = \frac{\dot{V}_{\text{Inf}}}{\dot{V}_{\text{Tw}}}$ vergleicht die vertikale Zuflussrate (Infiltrationsrate) aus dem Hangenden mit der horizontalen Zuflussrate von Tiefenwasser. Da die Mächtigkeit des (in dem vorliegenden Fall) schwach bis sehr schwach durchlässigen Deckgebirges die Zuflussrate aus dem Hangenden unmittelbar beeinflusst, ist dieses Verhältnis bei deckgebirgsfreien Lagerstätten höher ($\eta > 1$; z. B. Bergwerk Ibbenbüren; rechte Seite in Abbildung 50) als bei Lagerstätten mit hohen Deckgebirgsmächtigkeiten ($\eta < 1$; z. B. Bergwerk Westfalen; linke Seite in Abbildung 50; Tabelle 43).

Tabelle 43: Verhältnis zwischen der vertikalen Zuflussrate (Infiltrationsrate) aus dem Hangenden und der horizontalen Zuflussrate von Tiefenwasser.

	Bergwerk Ibbenbüren	Bergwerk Königsborn	Bergwerk Westfalen
Vertikale Zuflussrate \dot{V}_{Inf} (m³/d)	15.763	1.979	817
Horizontale Zuflussrate \dot{V}_{Tw} (m³/d)	6.286	2.483	2.722
Verhältnis $\eta = \frac{\dot{V}_{\text{Inf}}}{\dot{V}_{\text{Tw}}} (1)$	2,51	0,80	0,30

Auch der Vergleich mit dieser hydrogeologischen Lagerstättencharakteristik zeigt für die Faktoren „Infiltrationsspende“, „Reichweite des Einflussbereichs“ und „Resthohlraumvolumen“ vergleichbare Entwicklungen. Die Wirkstärken aller drei Faktoren werden bedeutender, je größer das Verhältnis der beiden Zuflussraten ist. Die Einflussnahme des Faktors

„Infiltrationsspende“ nimmt dabei wiederum streng monoton zu. Für Untertagebergwerke, in denen die vertikale Zuflussrate (Infiltrationsrate) nur einen untergeordneten Beitrag zum Gesamtzufluss leistet (vor allem in Lagerstätten mit hoher Deckgebirgsmächtigkeit [vergleiche dazu auch Abbildung 49]), ist der Einfluss der Infiltrationsspende unbedeutender.

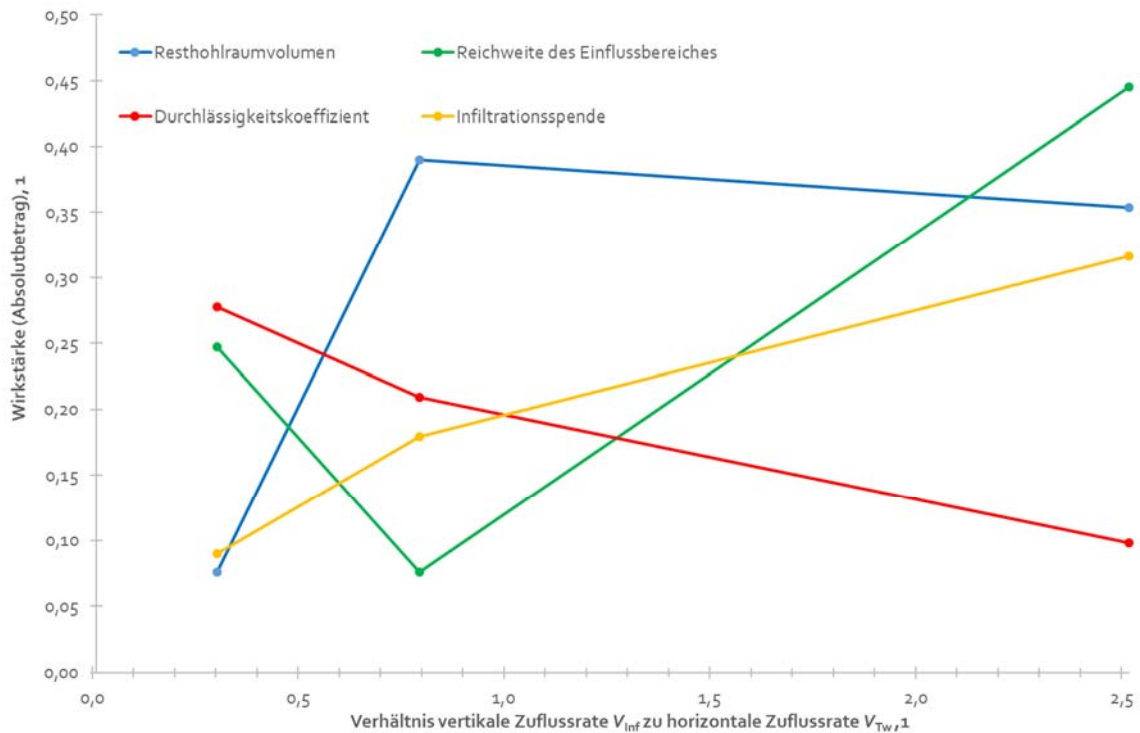


Abbildung 50: Wirkstärken in Abhängigkeit von dem Verhältnis zwischen der vertikalen und der horizontalen Zuflussrate (Anm.: die Darstellung der korrekten Formelzeichen \dot{V}_{inf} und \dot{V}_{Tw} ist in MS Excel nicht möglich).

Da die vertikale Zuflussrate (Infiltrationsrate) auch proportional von der Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereiches abhängt (vergleiche dazu Gleichung 20 im Abschnitt 4.2.4), nimmt auch die Einflussnahme dieses Faktors für Lagerstätten zu, deren Gesamtzufluss von dem vertikalen Zufluss (Infiltration) aus dem Hangenden dominiert wird.

Eine gegensätzliche Entwicklung zeigt hingegen der Faktor „Durchlässigkeitskoeffizient“. Hier gilt: Je höher das Verhältnis zwischen der vertikalen und horizontalen Zuflussrate ist, desto unbedeutender wird der Einfluss dieses Faktors auf die Grubenwasser(druck)höhe. Diese Kausalität ist wiederum damit zu begründen, dass der vertikale Zufluss aus dem Hangenden vor allem in Lagerstätten ohne Deckgebirge nahezu ungehindert in das offene Grubengebäude zusitzt. Wird eine Lagerstätte von einem Deckgebirge überdeckt, so nimmt dessen hydraulische Durchlässigkeit unmittelbar Einfluss auf die Höhe der vertikalen Zuflussrate (Infiltrationsrate). Es gilt: je mächtiger ein ([sehr] schwach durchlässiges) Deckgebirge ausgebildet ist, desto geringer ist die vertikale Zuflussrate (Infiltrationsrate)

und folglich das Verhältnis zur horizontalen Zuflussrate von Tiefenwasser (vergleiche dazu Gleichung 18 im Abschnitt 4.2.4). Die Entwicklung des Faktors „Resthohlraumvolumen“ lässt sich indes nicht begründen, da die Zuflussraten nicht von der Größe des Hohlraumvolumens abhängen.

Priorisierung der Faktoren

Die Erhebung hydrogeologischer und bergbaulicher Daten ist oftmals mit hohem methodischen und finanziellen Aufwand verbunden. Mit der vorliegenden Untersuchung wird ein Beitrag zur Steigerung der Effizienz in der Datenerhebung geleistet. Zukünftige Untersuchungen können den Fokus der Datenerhebung (Monitoring) auf die hydrogeologischen und bergbaulichen Faktoren richten, deren Kenntnis essentiell ist, um möglichst genaue Modellergebnisse zu erzielen. Für Faktoren mit geringerer Einflussnahme wäre es denkbar, „pauschale“, d. h. standortunspezifische Werte zu nutzen, sofern der Aufwand für die Erhebung unverhältnismäßig hoch wäre.

Für diese Bewertung ist es notwendig, die Wirkstärken mit standortspezifischer Gültigkeit in eine allgemeingültige Form zu überführen, die eine Vergleichbarkeit unabhängig von dem untersuchten Standort erlaubt. Dazu werden die Wirkstärken mit dem Kehrwert der jeweils höchsten Wirkstärke eines Untertagebergwerks multiplikativ so modifiziert (Normierung), dass die Ergebnisse die Verhältnisse der Faktoren zu dem jeweiligen Faktor mit der höchsten Wirkstärke beschreiben (Gleichung 107; Tabelle 44). Der Faktor mit der höchsten Wirkstärke nimmt dabei den Wert „1“ an. Unbedeutendere Faktoren haben geringere Verhältnisse. Die Normierung bewirkt, dass die Verhältnisse Größen der Dimension Eins (dimensionslos) sind (DIN EN ISO 80000-1 2013).

$$K_{\Delta h, \text{Verh.}} = \frac{K_{\Delta h, \tilde{x}_n}}{K_{\Delta h, \tilde{x}_{\max}}} \quad 107$$

mit

- | | | |
|----------------------------------|---|--|
| $K_{\Delta h, \text{Verh.}}$ | = | Verhältnis der Wirkstärken, normierte Wirkstärke (1), |
| $K_{\Delta h, \tilde{x}_n}$ | = | Koeffizient (Wirkstärke) eines Faktors (1), |
| $K_{\Delta h, \tilde{x}_{\max}}$ | = | maximaler Koeffizient (Wirkstärke) aller Faktoren (1). |

Abschnitt 8 – Bewertung und Diskussion der Ergebnisse

Auf Grundlage der untersuchten Untertagebergwerke ergeben sich in Abhängigkeit von der Deckgebirgsmächtigkeit folgende normierte Wirkstärken (Tabelle 44):

Tabelle 44: Normierte Wirkstärken $K_{\Delta h, Verh.}$.

Deckgebirgs- mächtigkeit $h_{M,DG}$	ohne		gering bis mittel		hoch
Faktor	$K_{\Delta h, Verh.}$	Faktor	$K_{\Delta h, Verh.}$	Faktor	$K_{\Delta h, Verh.}$
Reichweite Einflussber.	1,00	Resthohl- raumvolumen	1,00	Durchlässig- keitskoeffiz.	1,00
Resthohl- raumvolumen	0,80	Durchlässig- keitskoeffiz.	0,54	Reichweite Einflussber.	0,89
Infiltrations- spende	0,71	Infiltrations- spende	0,46	Infiltrations- spende	0,32
Durchlässig- keitskoeffiz.	0,22	Reichweite Einflussber.	0,20	Resthohl- raumvolumen	0,27

Anhand der Verhältnisse können die Wirkstärken in die folgenden vier Prioritätenklassen eingeteilt werden (Tabelle 45):

Tabelle 45: Klassifizierung der Prioritäten anhand der normierten Wirkstärken $K_{\Delta h, Verh.}$.

	normierte Wirkstärke ($K_{\Delta h, Verh.}$)
höchste Priorität	1,00
hohe Priorität	0,75 bis 0,99
mittlere Priorität	0,25 bis 0,74
geringe Priorität	0,00 bis 0,24

Für eine Lagerstätte ohne Deckgebirge zeigen die normierten Wirkstärken, dass drei Faktoren eine untereinander vergleichbar hohe Priorität besitzen (Tabelle 44). Dem Faktor „Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs“ ist dabei die höchste Priorität zuzuordnen. Die Bedeutung des bergbaulich geschaffenen Resthohlraumvolumens für das Bergwerk Ibbenbüren ist in etwa vergleichbar wichtig ($K_{\Delta h, Verh.} = 0,80$) wie die Bedeutung der Infiltrationsspende aus den hangenden Schichten ($K_{\Delta h, Verh.} = 0,71$). Der Durchlässigkeitskoeffizient des Gebirges ist im Vergleich dazu am ehesten zu vernachlässigen ($K_{\Delta h, Verh.} = 0,22$).

Die Priorisierung der Wirkstärken für deckgebirgsfreie Lagerstätten lautet wie folgt:

Höchste Priorität ($K_{\Delta h, Verh.} = 1,00$)

Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs ($K_{\Delta h, Verh.} = 1,00$)

Hohe Priorität ($0,75 \leq K_{\Delta h, Verh.} < 1,00$)

bergmännisch geschaffenes Resthohlraumvolumen ($K_{\Delta h, Verh.} = 0,80$)

Mittlere Priorität ($0,25 \leq K_{\Delta h, Verh.} < 0,75$)

flächenspezifische vertikale Infiltrationsspende ($K_{\Delta h, Verh.} = 0,71$)

Geringe Priorität ($K_{\Delta h, Verh.} < 0,25$)

Durchlässigkeitskoeffizient ($K_{\Delta h, Verh.} = 0,22$)

Bei einer Lagerstätte mit einer geringen bis mittleren Deckgebirgsmächtigkeit ist es vor allem wichtig, das bergmännisch geschaffene Resthohlraumvolumen möglichst genau zu evaluieren (Tabelle 44). Dieser Faktor hebt sich hinsichtlich seiner Bedeutung deutlich von denen der darauffolgenden Faktoren ab. Die hydraulische Gebirgsdurchlässigkeit ($K_{\Delta h, Verh.} = 0,54$) und die Infiltrationsspende aus den hangenden Schichten ($K_{\Delta h, Verh.} = 0,46$) sind für das Bergwerk Königsborn eine vergleichbare Einflussnahme zuzuordnen, die einer mittleren Priorität entspricht. Die Ausdehnung des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs ist hingegen bei diesem Lagerstättentyp von geringerer Bedeutung ($K_{\Delta h, Verh.} = 0,20$). Für Lagerstätten mit geringen bis mittleren Deckgebirgsmächtigkeiten lautet die Reihenfolge der Wirkstärkenpriorisierung wie folgt:

Höchste Priorität ($K_{\Delta h, Verh.} = 1,00$)

bergmännisch geschaffenes Resthohlraumvolumen ($K_{\Delta h, Verh.} = 1,00$)

Mittlere Priorität ($0,25 \leq K_{\Delta h, Verh.} < 0,75$)

1.) Durchlässigkeitskoeffizient ($K_{\Delta h, Verh.} = 0,54$),

2.) flächenspezifische vertikale Infiltrationsspende ($K_{\Delta h, Verh.} = 0,46$)

Geringe Priorität ($K_{\Delta h, Verh.} < 0,25$)

Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs ($K_{\Delta h, Verh.} = 0,20$)

Die Modellierung eines Grubenwasseranstiegs in einer Lagerstätte, das durch eine hohe Deckgebirgsmächtigkeit charakterisiert ist, setzt vor allem die Kenntnis der hydraulischen Durchlässigkeit der durchströmten Schichten voraus (Tabelle 45). Eine vergleichbar hohe Bedeutung für das Bergwerk Westfalen besitzt die Flächengröße des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs ($K_{\Delta h, Verh.} = 0,89$). Der geringere Anteil der vertikalen Zuflussrate (In-

filtrationsrate) am Gesamtzufluss führt dazu, dass die Infiltrationsspende eine weit weniger große Einflussnahme ausübt als bei Lagerstätten mit keinem oder nur geringmächtigem Deckgebirge. Folglich kommt diesem Faktor nur eine mittlere Bedeutung zu ($K_{\Delta h, Verh.} = 0,32$). Das bergmännisch geschaffene Resthohlraumvolumen nimmt bei diesem Lagerstättentyp die geringste Priorität ein ($K_{\Delta h, Verh.} = 0,27$). Daraus ergibt sich für Lagerstätten mit hohen Deckgebirgsmächtigkeiten die nachfolgende Priorisierung der Wirkstärken:

Höchste Priorität ($K_{\Delta h, Verh.} = 1,00$)

Durchlässigkeitskoeffizient ($K_{\Delta h, Verh.} = 1,00$)

Hohe Priorität ($0,75 \leq K_{\Delta h, Verh.} < 1,00$)

Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs ($K_{\Delta h, Verh.} = 0,86$)

Mittlere Priorität ($0,25 \leq K_{\Delta h, Verh.} < 0,75$)

- 1.) flächenspezifische vertikale Infiltrationsspende ($K_{\Delta h, Verh.} = 0,32$),
- 2.) bergmännisch geschaffenes Resthohlraumvolumen ($K_{\Delta h, Verh.} = 0,27$)

Weiterer Forschungsbedarf

Die vorliegende Untersuchung konzentriert sich auf drei Untertagebergwerke, die sich vor allem hinsichtlich ihrer Deckgebirgsmächtigkeit voneinander unterscheiden. Für andere Bergwerkstandorte ist eine Verifizierung des methodischen Ansatzes und der Gültigkeit der Übertragung auf die Natur durch weitere Untersuchungen notwendig. Weitere Untersuchungsgebiete könnten die bereits seit vielen Jahrzehnten vollständig gefluteten Untertagebergwerke im südlichen bis südöstlichen Ruhrgebiet sein. Inwieweit die Datengrundlage für diese Untertagebergwerke allerdings eine analoge Vorgehensweise zulassen, ist nicht bekannt.

Die vorgenommene Übertragung der Wirkstärken auf die Natur ist für deckgebirgsfreie Lagerstätten sowie für Lagerstätten mit mäßig bis sehr schwach durchlässigen Deckgebirgsschichten geprüft worden. Sofern das Deckgebirge von diesen Eigenschaften abweicht (z. B. höhere hydraulische Durchlässigkeiten), werden sich diese Korrelationen sicherlich ändern. Die Bewertung unterschiedlicher Deckgebirgsarten, z. B. im Hinblick auf deren hydraulischen Durchlässigkeit, wird im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht. Eine Ausweitung der Untersuchungsgebiete wäre jedoch von Interesse, um die Möglichkeit der Anwendbarkeit des analytischen Modells für andere Lagerstättentypen zu evaluieren. Ein weiteres mögliches Untersuchungsgebiet könnten beispielsweise die ehemaligen saarländischen und lothringischen Steinkohlenreviere sein, in denen die flözführenden Schichten des Oberkarbons durch die durchlässigeren Schichten des Buntsandsteins überdeckt werden.

Ausblick

Die Untersuchung besteht bislang in der Modellierung abgeschlossener bzw. weit vorangeschrittener Grubenwasseranstiege in Untertagebergwerken. Es zeigt sich, dass das analytische Modell geeignet ist, diese Grubenwasseranstiege zutreffend zu modellieren. Dieser Nutzen liegt vor allem darin, ein vertieftes Verständnis über die Vorgänge zu gewinnen, die im Zuge eines Grubenwasseranstiegs im Untergrund ablaufen. Ein weiterer Anwendungsbereich des analytischen Modells könnte aber auch die prospektive Modellierung zukünftiger Grubenwasseranstiege sein. Mit dem analytischen Modell stehe dann ein Instrument zur Verfügung, welches erlaubt, Grubenwasseranstiege mit einem vergleichsweise geringen Aufwand zu prognostizieren.

9 Zusammenfassung

Nach Stilllegung eines Untertagebergwerks ist es in der Regel nicht mehr notwendig, die Wasserhaltung in dem Umfang zu betreiben, wie es während der aktiven Gewinnungsphase erforderlich war. Durch die Reduzierung oder Außerbetriebnahme der Wasserhaltung steigt die Grubenwasser(druck)fläche im Grubengebäude an. Für die Modellierung des Grubenwasseranstiegs dienen vor allem numerische Strömungsmodelle. Diese Modelle setzen eine detaillierte Kenntnis über die räumliche Verteilung der hydrogeologischen und bergbaulichen Faktoren voraus. Oftmals liegen jedoch diese Daten nicht in dem erforderlichen Umfang und der notwendigen Qualität vor. Einige Daten können aufgrund fehlender Zugänglichkeit lediglich angenommen werden. Eine (nachträgliche) Erhebung dieser Daten ist nicht oder nur mit einem größeren finanziellen und methodischen Aufwand möglich.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Code auf Basis analytischer Methoden der Grundwasserdynamik entwickelt, mit welchem der Grubenwasseranstieg in hydraulisch isolierten Untertagebergwerken modelliert werden kann. Das analytische Modell zeichnet sich durch vereinfachte Annahmen eines Untertagebergwerks aus. Diese Arbeit beschreibt den Aufbau und die Anwendung dieses analytischen Modells, welches genutzt wird, um die Signifikanz ausgewählter Faktoren zu untersuchen, die den Grubenwasseranstieg beeinflussen. Diese Untersuchung leistet somit einen wesentlichen Beitrag für ein vertieftes Prozess- und Systemverständnis.

Zu den untersuchten Faktoren zählen der Durchlässigkeitskoeffizient, das bergmännisch geschaffene Resthohlraumvolumen, die Reichweite des hydraulisch wirksamen Einwirkungsbereichs für das Grubenwasser und die flächenspezifische vertikale Infiltrationspende von Grundwasser in das Grubengebäude. Die Untersuchung wird an den drei Steinkohlenbergwerken Ibbenbüren, Königsborn (Unna) und Westfalen (Ahlen) vorgenommen, die sich vor allem hinsichtlich des geologischen Aufbaus voneinander unterscheiden.

Die statistische Versuchsplanung (Design of Experiments) wird mit der vorliegenden Arbeit erstmalig im Bereich der speziellen Hydrogeologie im (Nach-)Bergbau angewendet. Damit sind die systembestimmenden Faktoren identifiziert und die Höhe ihrer Einflussnahme quantifiziert. Dazu werden die Grubenwasseranstiege für 25 Varianten je Untertagebergwerk berechnet, in denen die Faktoren entsprechend eines vorgegebenen Versuchsplans (ergänzter vollständiger faktorieller Versuchsplan) innerhalb ihres Vertrauensbereichs variieren. Die Auswirkung der Faktorenvariation wird anhand der Abweichung zwischen den Zeitreihen der berechneten und gemessenen Grubenwasser(druck)höhe bestimmt.

Der funktionale Zusammenhang zwischen der Variation der vier untersuchten Faktoren und der Zielgröße wird anhand nicht-linearer, multipler Beschreibungsmodelle beschrieben. Sehr hohe statistische Kennzahlen ($R^2 > 0,95$ und $Q^2 > 0,75$) bestätigen eine ausgezeichnete Modellgüte. Die verbleibenden Fehler, die den Teil des zu beschreibenden Prozesses darstellen, der nicht durch das gewählte Beschreibungsmodell erklärt werden kann, sind mit Werten zwischen 1,57 % und 3,50 % als gering und tolerierbar einzustufen.

Die Wirkstärke eines Faktors wird anhand der partiellen Ableitung dieses Beschreibungsmodells nach den jeweiligen Faktoren sowie der Integration der Funktionswerte über den Vertrauensbereich bestimmt. Dadurch wird gezeigt, dass die (mittlere) Wirkstärke dem Regressionskoeffizienten der linearen Terme entspricht. Die auf diesem Wege ermittelten Wirkstärken sind gültig, sofern der höchste Grad des polynomischen Beschreibungsmodells 2 sowie der Vertrauensbereich symmetrisch um den Nullpunkt angelegt ist. Abweichungen von diesen Voraussetzungen bewirken eine Veränderung der Wirkstärken.

Die Werte der Wirkstärken sind standortspezifisch. Die Entwicklung von drei Wirkstärken (Durchlässigkeitskoeffizient, Infiltrationsspende und [zum Teil] Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs) korrelieren indes mit zwei dimensionslosen hydrogeologischen Lagerstättencharakteristika, die einerseits die Deckgebirgsmächtigkeit und andererseits das Verhältnis der Zuflussraten berücksichtigen. Vergleichbare Korrelationen mit dem Faktor „Resthohlraumvolumen“ bestehen nicht.

Für die Bewertung werden die normierten Wirkstärken in Prioritätenklassen eingeordnet. Für deckgebirgsfreie Lagerstätte ist eine vergleichbar gute Kenntnis über die Reichweite des Einflussbereichs, Resthohlraumvolumen und der Infiltrationsspende erforderlich. Die Kenntnis über das Resthohlraumvolumen ist vor allem für Lagerstätten mit geringer bis mittlerer Deckgebirgsmächtigkeit wichtig, während der hydraulischen Gebirgsdurchlässigkeit und der Infiltrationsspende eine mittlere Priorität zuzuordnen sind. In Lagerstätten mit hoher Deckgebirgsmächtigkeit kommen der hydraulischen Gebirgsdurchlässigkeit und der Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs die höchsten Bedeutungen zu.

Mit dem Erkenntnisgewinn können nun Monitoringmaßnahmen im bergbaulichen Lebenszyklus gestaltet und optimiert werden, indem der Fokus des Monitorings auf die systembestimmenden Faktoren gelegt wird. Für weniger bedeutsame Faktoren wäre es denkbar, „pauschale“, d. h. standortunspezifische Werte zu verwenden.

Die vorliegende Untersuchung stützt sich auf drei Untertagebergwerke. Um die lagerstättenspezifischen Wirkstärken zu verifizieren, sollten die Untersuchungen an weiteren gleichartigen Untertagebergwerken erweitert werden. Ebenso könnte die Methodik auf Lagerstätten mit anderen hydrogeologischen Eigenschaften übertragen werden. Bislang

sind die abgeschlossenen Grubenwasseranstiege retrospektiv betrachtet, um ein grundsätzliches Prozess- und Systemverständnis zu erlangen. Sehr hohe Q^2 -Werte belegen indes auch, dass das analytische Modell geeignet ist, Prognosen für zukünftige Grubenwasseranstiege zu erstellen. Daher sollte der Einsatz des analytischen Modells für Prognosezwecke zukünftig geprüft werden.

10 Literatur- und Quellenverzeichnis

- ADAM, C., GLASSER, W. & HÖLTING, B. (2000): Hydrogeologisches Wörterbuch. - 311 S.; Stuttgart (Thieme).
- ANGRICK, J. (1999): Bergwerk Westfalen. Geologie und Lagerstätte. - 18 S.
- ANSELMANT, B., SCHOEMIG, V., KESTEN, C. & WEUSTER-BOTZ, D. (2012): Statistical vs. stochastic experimental design: An experimental comparison on the example of protein refolding. - *Biotechnology Progress*, **28** (6), 1499–1506, 6 Abb., 4 Tab.
- ARENAS, I., FERRALI, A., RODRÍGUEZ-ESCRICH, C., BRAVO, F. & PERICÁS, M. A. (2017): *cis*-4-alkoxydialkyl- and *cis*-4-alkoxydiarylprolinol organocatalysts: High throughput experimentation (HTE)-based and design of experiments (DoE)-guided development of a highly enantioselective *aza*-Michael addition of cyclic imides to α,β -unsaturated aldehydes. – *Adv. Synth. Catal.*, **359** (14): 2414–2424, 2 Abb., 5 Tab.
- ARNOLD, H. (1960): Übersichtskarte von Nordrhein-Westfalen 1 : 100.000. Erläuterungen zu Blatt Münster C4310.
- AURADA, K. D. (1970): Berechnung des Wiederanstiegsprozesses im Grubengebäude des Kupferschieferbergbaus in der Mansfelder Mulde mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode. - *Wasserwirtschaft-Wassertechnik*, **20** (8):264–270, 6 Abb., 3 Tab.
- BACKHAUS, K., ERICHSON, B., PLINKE, W. & WEIBER, R. (2015): Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. - 14. Aufl., 647 S.; Heidelberg, Berlin (Springer).
- BÄRTLING, R. (1911): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Preußen und benachbarten Bundesstaaten. Lieferung 163. Blatt Unna, 144 S., 9 Taf.; Berlin (herausgegeben von der Königlich Preußischen Geologischen Landesanstalt).
- BÄSSLER, R. (1970): Hydrogeologische, chemische und Isotopen-Untersuchungen der Grubenwässer des Ibbenbürener Steinkohlenreviers. - *Z. dt. geol. Ges., Sonderheft Hydrogeologie und Hydrogeochemie*: 209–286.
- BAGLIKOW, V. (2010): Schadensrelevante Auswirkungen des Grubenwasseranstiegs im Erkelenzer Steinkohlenrevier. - Dissertation, RWTH Aachen: 121 S.; Herne (Blomeke).
- BALFAGÓN, A. C., SERRANO-HERNANZ, A., TEIXIDO, J. & TEJEDOR-ESTRADA, R. (2010): Comparative study of neural networks and least mean square algorithm applied to the optimization of cosmetic formulations. - *International Journal of Cosmetic Science*, **32**: 376–386, 3 Abb., 14 Tab.
- BALTES, B., FISCHER-APPELT, K., LARUE, P.J., JAVERI, V., THIEN, J., VEERHOFF, M., PAAS, N., JUSTEN, A., NAVARRO, M., OBERMANN, P., HIMMELSBACH, T., WITTHÜSER, K., HARNISCHMACHER, S., ZOBEL, J., SCHMID, G. P., KÖNIG, C., ROSEN, B., WENDLAND, E. C., MÜLLER, W., KLINGER, C. &

- HEWIG, R. (1998): Entwicklung und Anwendung analytischer Methoden zur Eignungsuntersuchung der Verbringung bergbaufremder Rückstände in dauerhaft offene Grubenräume im Festgestein. Abschlussbericht (Hauptband). - Bericht 140 der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 126 S., 60 Abb., 10 Tab.
- BANDEMER, H. & BELLMANN, A. (1994): Statistische Versuchsplanung. - 4. Aufl., 164 S., zahlr. Abb. und Tab.; Stuttgart, Leipzig (Teubner).
- BANKS, D. (2001): A variable-volume, head dependent mine water filling model. - Ground Water, **39** (3): 362–365, 2 Abb., 1 Tab.
- BANKS, D., BURKE, S. P. & GRAY, C. G. (1997): Hydrogeochemistry of coal mine drainage and other ferruginous waters in north Derbyshire and south Yorkshire, United Kingdom. - Quarterly Journal of Engineering Geology, **30**: 257–280.
- BARRENBLOTT, G. E., ZHELTOV, J. P. & KOCHINA, J. N. (1960): Basic concepts in the theory of homogeneous liquids in fissured rocks. - J. Appl. Math. Mech., **24** (5): 1286–1303; New York.
- BEAR, J., IRMAY, S. & ZASLAVSKY, D. (1968): Physical principles of water percolation and seepage. - 465 S.; Paris (UNESCO).
- BEAR, J. & BACHMAT, Y. (1991): Introduction to modeling of transport phenomena in porous media. - XXIV + 554 S.; Dordrecht (Springer).
- BEIMDIECK, J. (2015): Untertägige Wasserdammwerke unter Gebirgsbewegung – eine Herausforderung an die Bauausführung. - Mining Report, **151** (2): 129–137, 11 Abb.
- BLUME, H.-P., BRÜMMER, G. W., HORN, R., KANDELER, E., KÖGEL-KNABER, I., KRETZSCHMAR, R., STAHR, K. & WILKE, B.-M. (2010): SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL - Lehrbuch der Bodenkunde. - 16. Aufl., 569 S., 245 Abb., 96 Tab.; Heidelberg (Spektrum Akademischer Verlag).
- BALTES, B., FISCHER-APPELT, K., LARUE, P. J., JAVIERI, V., THIEN, J., VEERHOFF, M., PAAS, N., JUSTEN, A., NAVARRO, M., OBERMANN, P., HIMMELSBACH, T., WITTHÜSER, K., HARNISCHMACHER, S., ZOBEL, J., SCHMID, G. P., KÖNIG, C., ROSEN, B., WENDLAND, E. C., MÜLLER, W., KLINGER, C. & HEWIG, R. (1998): Entwicklung und Anwendung analytischer Methoden zur Eignungsuntersuchung der Verbringung bergbaufremder Rückstände in dauerhaft offene Grubenräume im Festgestein. Abschlussbericht (Hauptband). - Bericht 140 der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 126 S., 60 Abb., 10 Tab.
- BOTH, S., EGGERSGLÜB, J., LEHNBERGER, A., SCHULZ, T., SCHULZE, T. & STRUBE, J. (2013): Optimizing established processes like sugar extraction from sugar beets – design of experiments versus physicochemical modeling. - Chem. Eng. Technol., **36** (12): 2125–2136, 11 Abb., 1 Tab.
- BRACE, W. F. (1980): Permeability of crystalline and argillaceous rocks. - Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst., **17**: 241–251, 6 Abb.; Oxford (Pergamon Press).

- BURGHARDT, D., COLDEWEY, W. G., MELCHERS, C., MEßER, J., PAUL, M., WALTER, T., WESCHE, D., WESTERMANN, S., WIEBER, G., WISOTZKY, F. & WOLKERSDORFER, C. (2017): Glossar bergmännische Wasserwirtschaft. - Fachsektion Hydrogeologie e. V. in der DGGV e. V / AK Grubenwasser / COLDEWEY, W.G. [Hrsg.], 1. Aufl., 79 S.; Neustadt/Wstr.
- BURKE, S. & BARBER, J. (2004): An overview of mine water rebound in the South Yorkshire Coalfield. - In: JARVIS, A. P., DUDGEON, B. A. & YOUNGER, P. L. (Hrsg.): Tagungsband des International Mine Water Association (IMWA) Symposiums vom 20.–25. September 2004 in Newcastle upon Tyne, 61–66; Newcastle upon Tyne.
- BUSCH, W., WALTER, D., XI, F., YIN, X., COLDEWEY, W. G., WESCHE, D., HEJMANOWSKI, R., MALINOWSKI, A. A., KWINTA, A. & WITKOWSKI, W. T. (2016): Bergwerk Ibbenbüren der RAG AG. Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches. - 241 S., 164 Abb., 16 Tab., 7 Anh., 5 Anl.; Clausthal-Zellerfeld (veröffentl. Gutachten im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW, Dezernat 45).
- CAPACI, F., BERGQUIST, B., KULAHCIA, M. & VANHATALOA, E. (2017): Exploring the use of design of experiments in industrial processes operating under closed-loop control. - Quality and Reliability Engineering International, **33** (7): 1601–1614, 5 Abb. 10 Tab.
- CLOSTERMANN, M., MITTRACH, J. & WIETHOFF, K. (1997): Schacht Königsborn 4 der ehemaligen Schachtanlage Königsborn in Bönen, Zechenstraße, der Ruhrkohle Bergbau AG, Herne. Ausweisung des Schachtschutzbereiches. - 14 S., 1 Anl.; Essen (unveröffentl. Gutachten der DMT GmbH & Co. KG im Auftrag der Ruhrkohle Bergbau AG).
- COLDEWEY, W. G., KORIES, H. & WENDLAND, E. (1997): Modellierung der Grundwasserströmung in der Umgebung von Grubenbauen im Hinblick auf die Verbringung von Reststoffen. - Grundwasser im Ruhrgebiet: 44–53, 4 Abb.; Essen (Sven von Loga).
- COLDEWEY, W. G. & MÜLLER, W. (1994): Kurzstellungnahme zum Anstieg des Grubenwassers im Bereich der stillgelegten Schachtanlage Königsborn und zu möglichen Auswirkungen auf das oberflächennahe Grundwasser. - 5 S.; Essen. - [Unveröff. Gutachten der DMT GmbH & Co. KG im Auftrag der Ruhrkohle Bergbau AG].
- COLDEWEY, W. G., WESCHE, D., RUDOLPH, T. & MELCHERS, C. (2014): Methods of evaluating the hydraulic barrier effects of the Emscher marl following cessation of German hard-coal mining. - In: SUI, W., SUN, Y. & WANG, C. (Hrsg.): Tagungsband der 12. International Mine Water Association (IMWA) Konferenz in Xuzhou, 693–698, 3 Abb.
- CORBEL, S., KAISER, J. & VICENTIN, S. (2017): Coal mine flooding in the Lorraine-Saar basin: experience from the French mines. - In: WOLKERSDORFER, C., SARTZ, L., SILLANPÄÄ, M. & HÄKKINEN, A. (Hrsg.): Tagungsband der 13. International Mine Water Association (IMWA) Konferenz vom 25.–30. Juli 2017 in Lappeenranta, **1**: 161–166; Lappeenranta.

- CZITROM, V. (1999): One-Factor-at-a-Time Versus Design Experiments. - The American Statistician, **53** (2): 126–131, 7 Abb., 6 Tab.
- DELTA H (2013): SPRING. Simulation of Processes in Groundwater. - Benutzerhandbuch. - Version 4.1, 419 S.; Witten.
- DENNEBORG, M., BERK, W. VAN, KÖNIG, C. M., SCHWARZBAUER, J., RÜDE, T. R. & PREUSS E, A. (2017): Gutachten zur Prüfung möglicher Umweltauswirkungen des Einsatzes von Abfall- und Reststoffen zur Bruch-Hohlraumverfüllung in Steinkohlenbergwerken in Nordrhein-Westfalen, Teil 1. Endbericht. - XVII + 217 S.; Aachen (Gutachten der AHU GmbH im Auftrag des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen sowie des Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Industrie, Mittelstand und Handwerk des Landes Nordrhein-Westfalen).
- DOMALSKI, R. F. (1987): Bergmännische Wasserwirtschaft der Steinkohlenbergwerke Preussag AG Kohle/Ibbenbüren und Gewerkschaft Sophia-Jacoba/Hückelhoven. Ein Vergleich. - Dissertation, TU Clausthal, 174 S., 12 Abb., 18 Tab.; Clausthal.
- DROBNIIEWSKI, M. (2017): Grubenwasserhaltung im Nachbergbau. - Vortrag auf der Dialogveranstaltung des Forums Bergbau und Wasser am 12. Dezember 2017 an der Technischen Hochschule Georg Agricola Bochum, 20 Folien.
- DROZDZEWSKI, G., BORNEMANN, O., KUNZ, E. & WREDE, V. (1980): Beiträge zur Tiefentektonik des Ruhrkarbons. - 192 S., 108 Abb., 7 Tab., 31 Taf.; Krefeld.
- DROZDZEWSKI, G., HIB, M., LEHMANN, F., MICHEL, G., SKUPIN, K., STAUDE, H., THIERMANN, A., DAHM-ARENS, H. & FINKE, W. (1995): Geologie im Münsterland. - 195 S., 50 Abb., 6 Tab., 1 Taf.; Krefeld (Veröffentlichung des Geologischen Landesamts Nordrhein-Westfalen).
- DUDENREDAKTION (o. J.): „Versuch“ auf Duden online.
URL: <https://www.duden.de/node/195546/revision/195582> (Abrufdatum: 15.04.2020).
- DUPUIT, A. J. (1863): Etudes théorétiques et pratiques sur le mouvement des eaux à travers les terrains permeables. - 2. Aufl., 304 S., 6 Taf., 2 Tab.; Paris (Dunod) (in französisch).
- ECKART, M. (1993): Problems with flooding in the Ronneburg mining district. - In: AHLSTROEM, P. E., CHAPMAN, C. C., KOHOUT, R. & MAREK, J. (Hrsg.): Tagungsband der International Atomic Energy Agency (IAEA) Konferenz vom 5.–11. September 1993 in Prag, 2: High level radioactive waste and spent fuel management, 509–516; Prag.
- ECKART, M. (2018, 28. Mai): Persönliches Gespräch mit Leiter der Abteilung Bergmännische Wasserwirtschaft der DMT GmbH & Co. KG (Eigenes Gesprächsprotokoll).
- ECKART, M. (2019, 20. Februar): Persönliches Gespräch mit Leiter der Abteilung Bergmännische Wasserwirtschaft der DMT GmbH & Co. KG (Eigenes Gesprächsprotokoll).

- ECKART, M., BRÜGGEMANN, HEWIG, R., KUNZ, LANGOSCH, MARZILGER, A. B. K., RÜTERKAMP, P., SCHIFFER, R. & TEKOOK (2004): Verfahrensentwicklung zur Ermittlung des offenen Resthohlraumvolumens in Steinkohlenbergwerken (Kurztitel: Resthohlraumvolumen). - 114 S., 50 Abb., 14 Tab.; Essen (unveröffentl. Gutachten der DMT GmbH & Co. KG im Auftrag der Deutschen Steinkohle AG).
- ECKART, M., GZYL, G., KORIES, H., METZ, M. & RENGERS, R. (2006): Modellierung von Grubenflutungen in Wechselwirkung mit Deckgebirgs-Grundwasserleitern. - In: MEIER, G., SROKA, A., LÖBEL, K.-H., KLAPPERICH, H., TONDERA, D., BUSCH, W., MAAS, K., MARTENS, P. N., PREUß, A. & FRENZ, W. (Hrsg.): 6. Altbergbaukolloquium vom 9.–11. November 2006 in Aachen, 127–138, 9 Abb.; Nossen (Wagner Digitaldruck und Medien GmbH).
- ECKART, M., KLINGER, C., UNLAND, W., RENGERS, R., METZ, M. & BLACHER, C. (2006): Prognose der Flutungsauswirkungen im Steinkohlenbergbau. - Glückauf, **142** (6): 262–269, 10 Abb., 1 Tab.
- ECKART, M., KLINGER, C. & FRANKENHOFF, H. (2015): Nutzung von statistischen Methoden bei der Flutungsprognose von Steinkohlenbergwerken - speziell: Flutungsprognose für die Steinkohlenbergwerke im Saarland. - Präsentation auf dem Berg- und Hüttenmännischer Tag am 18.6.2015 in Freiberg, Grundwasseranstieg in stillgelegten Bergbaubereichen, 26 Folien.
- ECKART, M. & RÜTERKAMP, P. (2016): Berechnung des Resthohlraumvolumens. - 16 S., 11 Abb., 1 Tab.; Essen (unveröffentl. Gutachten der DMT GmbH & Co. KG im Auftrag der RAG Aktiengesellschaft).
- ECKART, M., RÜTERKAMP, P. & ADAM, B. (2018): Kurzdokumentation zur Emschermulde. - 19 S., 12 Abb., 3 Tab.; Essen (unveröffentl. Bericht der DMT GmbH & Co. KG im Auftrag der Technischen Hochschule Georg Agricola Bochum).
- ERIKSSON, L., JOHANSSON, E., KETTANEH-WOLD, N., WIKSTRÖM, C. & WOLD, S. (2008): Design of Experiments. Principles and Applications. - 3. Aufl., 459 S.; Umeå (Umetrics Academy).
- EWEN, J., PARKIN, G. & O'CONNELL, P. E. (2000): SHETRAN: Distributed river basin flow and transport modelling system. - Journal of Hydrologic Engineering, **5**: 250–258, 10 Abb., 4 Tab.
- FAHRMEIR, L., KNEIB, T. & LANG, S. (2009): Regression: Modelle, Methoden und Anwendungen. - 2. Aufl., 520 S.; Heidelberg, Berlin (Springer).
- FELLNER, A. (1999): Bergmännisches Handwörterbuch für Fachausdrücke im Salzbergbau- und Sudhüttenwesen. - 697 S.; Wien (Eigenverlag Herta Fellner).
- FERNANDEZ-RUBIO, R. (1979): Drainage of coal and lignite mines. - In: ARGALL, G. O. & BRAWNER, C. O.: Mine Drainage. - Tagungsband des 1. International Mine Drainage Symposiums, 492–506; San Francisco (Freeman).

- FISHER, R. A. (1935): The design of experiments. - XI+252 S.; 5 Abb., 40 Tab.; Edingburgh (Oliver & Boyd).
- FURTAK, H. & LANGGUTH, H.-R. (1967): Zur hydrochemischen Kennzeichnung von Grundwässern und Grundwassertypen mittels Kennzahlen. - Mem. IAH Konferenz, 1965, 7: 89–96, 5 Abb.; Hannover.
- GARLING, F. & DITTRICH, G. (1979): Gesteinsbemusterung. - 1. Aufl., 54 S.; Leipzig (VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie).
- GESETZ ZUR FINANZIERUNG DER BEENDIGUNG DES SUBVENTIONIERTEN STEINKOHLENBERGBAUS ZUM JAHR 2018 vom 20. Dezember 2007 (BGBl. I S. 3086), das zuletzt durch Artikel 306 der Verordnung vom 31. Mai 2015 (BGBl. I S. 1474 und 1518) geändert worden ist.
- GOERKE-MALLET, P. (2000): Untersuchungen zu raumbedeutsamen Entwicklungen im Steinkohlenrevier Ibbenbüren unter besonderer Berücksichtigung der Wechselwirkungen von Bergbau und Hydrologie. - Dissertation, RWTH Aachen: 226 S.; Aachen (Mainz).
- GOERKE-MALLET, P. (2019, 3. April): Persönliches Gespräch mit Mitarbeiter des Forschungszentrums Nachberg und ehemaligen Markscheider des Bergwerks Ibbenbüren (Eigenes Gesprächsprotokoll).
- GOH, T. N. (2013): Management of Parametric Response in Design of Experiments. - Quality and Reliability Engineering International, 30 (8): 1191–1195, 1 Abb.
- GVST (2019): Jahresbericht 2019. - 38 S.; Essen (Gesamtverband Steinkohle e. V.).
- HAHNE, C. & SCHMIDT, R. (1982): Die Geologie des Niederrheinisch-Westfälischen Steinkohlengebietes. - 106 S., 88 Abb., 11 Tab., 1 Anl.; Essen (Verlag Glückauf).
- HAMER, H., LILIENFEIN, M., RICHTER, J. & SCHREYER, J. (1995): Das hydrogeologische System im Umfeld der Uranlagerstätte Königstein und seine Darstellung im Grundwassermodell. In: MERKEL, B., HURST, S. LÖHNERT, E. P. & STRUCKMEIER, W. (Hrsg.): Uranium-Mining and Hydrology. - Tagungsband der Int. Conference and Workshop im Oktober 1995 in Freiberg, 225–234.
- HEITFELD, M., ROSNER, P. & MÜHLENKAMP, M. (2012): Untersuchungen zu den Ursachen von Geländehebungen bei der Flutung von Steinkohlenbergwerken sowie Bearbeitung von Prognosen für das Ruhrrevier. 3. Bericht. Detailbetrachtung Bergwerk Königsborn. - 52 S., 7 Abb., 7 Anh., 8 Anl.; Aachen (unveröffentl. Gutachten im Auftrag der RAG Aktiengesellschaft).
- HEITFELD, M., ROSNER, P. & MÜHLENKAMP, M. (2014): Auswirkungen von Geländehebungen im Zuge des Grubenwasseranstiegs im Ruhrrevier. Ein Ansatz zur Bewertung der Risiken. - In: MEIER, G., SROKA, A., LÖBEL, K.-H., KLAPPERICH, H., TONDERA, D. & BUSCH, W. (Hrsg.): 14. Altbergbaukolloquium vom 6.–8. November 2014 in Gelsenkirchen, 41–60, 8 Abb.; Nossen (Wagner Digitaldruck und Medien GmbH).

- HEITFELD, M. & ROSNER, P. (2015): Auswirkungen eines Grubenwasseranstiegs im Ruhrgebiet - bisherige Erfahrungen und Strategien. - In: BEZIRKSREGIERUNG ARNSBERG & KRETSCHMANN, J. (Hrsg.) (2017): NACHBergbauzeit in NRW - Beiträge 2011 - 2013 - 2015, 143–155, 12 Abb.; Bochum (Selbstverlag des Deutschen Bergbau-Museums Bochum).
- HEITFELD, M., ROSNER, P., SAHL, H. & SCHETELIG, K. (2005): Grubenwasseranstieg im Steinkohlenbergbau. Einflussfaktoren, Auswirkungen und Folgenutzung am Beispiel des Aachener und des Erkelenzer Reviers. - In: BUSCH, W., MAAS, K., MEIER, G., SROKA, A., LÖBEL, K.-H., KLAPPERICH, H. & TONDERA, D. (Hrsg.): 5. Altbergbaukolloquium vom 3.–5. November 2005 in Clausthal-Zellerfeld, 433–452, 10 Abb.; Essen (VGE Verlag GmbH).
- HERBERT, H.-J. & SANDER, W. (1987): Die Flutung des Kalibergwerks Hope. Ergebnisse des geochemischen MeBprogramms. - Kali und Steinsalz, **9** (10): 326–333.
- HOCHLEITNER, R. (2009): Der neue Kosmos-Mineralienführer. 700 Mineralien, Edelsteine und Gesteine. - 1. Aufl., 448 S.; Stuttgart (Franckh Kosmos Verlag).
- HÖLTING, B. (1989): Methoden zur Abschätzung des Dargebots von Grundwasserleitern. - In: DVGW Fortbildungskurs Grundwasser, DVGW-Schriftenreihe Wasser, **201**: 2. Aufl., **7.1–7.15**: 10 Abb.; Eschborn (DVGW).
- HÖLTING, B. & COLDEWEY, W. G. (2013): Hydrogeologie. Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. - 438 S., 137 Abb., 92 Tab.; Heidelberg, Berlin (Springer).
- HÜLSMANN, K. H., SCHLÜTER, H., PIEPER, C. & SCHORN, H. (2002): Untertägige Wasserdämme für große Stauhöhen. - Glückauf, **138** (6): 274–288, 14 Abb.
- HUSKE, J. (2006): Die Steinkohlenzechen im Ruhrrevier. Daten und Fakten von den Anfängen bis 2005. - 3. Aufl., 1.137 S.; Bochum (Veröffentlichungen aus dem Deutschen Bergbau-Museum Bochum).
- HUYSEN, A. (1855): Die Soolquellen des Westfälischen Kreidegebirges, ihr Vorkommen und muthmaasslicher Ursprung. - Z. dt. geol. Ges., **8**: 17–252; Berlin (Wilhelm Hertz).
- JÄGER, B., OBERMANN, P. & WILKE, F. L. (1990): Studie zur Eignung von Steinkohlenbergwerken im rechtsrheinischen Ruhrkohlenbezirk zur Untertageverbringung von Abfall- und Reststoffen. - 4 Bände.
- JAKUBICK, A. T., JENK, U. & KAHNT, R. (2002): Modelling of mine flooding and consequences in the mine hydrogeological environment: flooding of the Königstein mine, Germany. - Environ. Geol., **42** (2–3): 222–234, 11 Abb., 6 Tab.
- JANG, J., NARSILIO, G. A. & SANTAMARINA, J. C. (2011): Hydraulic conductivity in spatially varying media - a pore-scale investigation. - Geophys. J. Int., **184**: 1.167–1.179, 12 Abb., 1 Tab.

- JOGWICH, A. & JOGWICH, M. (2009): Technische Strömungslehre für Studium und Praxis. Reibungsfreie und reibungsbehaftete Strömung - Durchflussmessung - Erweiterte Energiegleichung. - 2.Aufl., 577 S., 277 Abb., 34 Tab.; München (Oldenbourg Industrieverlag GmbH).
- JOB, B. (1987a): Inrushes at British collieries: 1851 to 1970. - Colliery Guardian, **235** (5): 192–199; London.
- JOB, B. (1987b): Inrushes at British collieries: 1851 to 1970. - Colliery Guardian, **235** (6): 232–235; London.
- JOLLEY, S. J., DIJK, H., LAMENS, J. H., FISHER, Q. J., MANZOCCHI, T., EIKMANS, H. & HUANG, Y. (2007): Faulting and fault sealing in production simulation models. Brent Province, northern North Sea. - Petroleum Geoscience, **13**: 321–340, 21 Abb., 1 Tab.; London (Geological Society).
- JUCH, D. (1994): Kohleninhaltserfassung in den westdeutschen Steinkohlenlagerstätten. - Forsch. Geol. Rheinl. U. Westf., **38**: 189–307, 55 Abb., 7 Tab., 2 Taf.; Krefeld.
- KARRENBERG, H. & MEINICKE, K. (1962): Porosität und Raumgewicht von Sandsteinen des Ruhrkarbons. - Fortschr. Geol. Rheinld. u. Westf., **3** (2): 667–678, 3 Abb., 3 Tab., 2 Taf.; Krefeld.
- KARRENBERG, H. (1981): Hydrogeologie der nicht verkarstungsfähigen Festgesteine. - 284 S.; Wien (Springer).
- KELLER, G. (1968): Zur Geologie des Piesberges bei Osnabrück. - Z. dt. geol. Ges., **117**: 743–748.
- KERKIS, E. E. (1955): Opređenje Radiusa Wlijanija Pri Rastschete Wodopritokow. - 1. Aufl., 100 S., 20 Abb., 8 Tab.; Moskau (Ugletekhizdat).
- KLEINE VENNEKATE, G., NOORSALEHI-GARAKANI, S., URAI, J. L. & ZIEGLER, M. (2014): Numerische Simulation des Clay-Smear-Prozesses in Sandboxversuchen. - Geotechnik, **37** (2): 83–95, 15 Abb., 1 Tab.; Berlin (Ernst & Sohn).
- KLEPPMANN, W. (2008): Taschenbuch Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren. - 5. Aufl., 323 S., 8 Anh.; München, Wien (Carl Hanser).
- KORIES, H., ECKART, M. & RÜTERKAMP, P. (2017a): Kurzdokumentation zum Bergwerk Ibbenbüren Westfeld. - 15 S., 10 Abb., 3 Tab.; Essen (unveröffent. Bericht der DMT GmbH & Co. KG im Auftrag der Technischen Hochschule Georg Agricola Bochum).
- KORIES, H., ECKART, M. & RÜTERKAMP, P. (2017b): Kurzdokumentation zum Bergwerk Königsborn. - 21 S., 16 Abb., 4 Tab.; Essen (unveröffent. Bericht der DMT GmbH & Co. KG im Auftrag der Technischen Hochschule Georg Agricola Bochum).

- KRATZSCH, H. (2013): Bergschadenkunde. - 6. Aufl., 948 S., 511 Abb., 35 Taf., 36 Anh.; Bochum (Deutscher Markscheider-Verein e.V.).
- KROTTMAIER, J. (1994): Versuchsplanung. Ein integraler Bestandteil der TQM-Strategie. - 3. Aufl., 245 S., 7 Anh.; Zürich (Industrielle Organisation).
- KUKUK, P. (1938): Geologie des niederrheinisch-westfälischen Steinkohlengebietes. - 706 S., 743 Abb., 48 Tab., 14 Taf.; Berlin (Springer).
- KUMAR, V., BHALLA, A. & RATHORE, A. S. (2013): Design of experiments applications in bioprocessing: Concepts and approach. - Biotechnol. Prog., **30** (1): 86–99, 7 Abb., 6 Tab.
- KUNZ, E. (1994): Gasinhalt der Nebengesteine des Steinkohlengebirges. - Glückauf-Forschh., **55** (4+5): 106–110, 4 Tab.; Essen.
- KUSSAKIN, I. P. (1935): Künstliche Erniedrigung von Grundwasserniveaus. - 248 S., 123 Abb., 34 Tab.; Onti.
- LANARI, D., MARCOTULLIO, M. C. & NERI, A. (2018): A design of experiment approach for ionic liquid-based extraction of toxic components-minimized essential oil from *Myristica fragans* Houtt. Fruits. - Molecules 2018, **23** (2.817): 11 S., 6 Abb., 3 Tab.
- LANDESUMWELTAMT BRANDENBURG (LUA) (2001): Tagebauseen: Wasserbeschaffenheit und wassergütewirtschaftliche Sanierung - Konzeptionelle Vorstellungen und erste Erfahrungen. - Studien und Tagungsberichte, Schriftenreihe des Landesumweltamtes Brandenburg, **35**: 77 S., 26 Tab.; Cottbus (Bearbeitung im Auftrag des Landesumweltamtes Brandenburg, Abt. Gewässerschutz und Wasserwirtschaft, Ref. Wasserwirtschaft Süd W 10/3).
- LOTZE, F., SEMMLER, W., KÖTTER, K. & MAUSOLF, F. (1962): Hydrogeologie des Westteils der Ibbenbürener Karbonscholle. - 113 S.; Köln (Westdeutscher Verlag).
- LUCKNER, L. (1985): Modeling of migration processes with coupled migrants and their reduction to control models. - Tagungsband der 2. International Mine Water Association (IMWA) Konferenz in Granada, **2**: 737–748, 4 Abb.
- LUEGER, O. (1962): Lexikon der Technik. Band 4. Lexikon des Bergbaus A – Z. - 727 S.; Stuttgart (Deutsche Verlags Anstalt).
- MACCALMAN, A. D., BEERY, P. T. & PAULO, E. P. (2016): A systems design exploration approach that illuminates tradespaces using statistical experimental designs. - Systems Engineering, **19** (5), 409–421.
- MAKSIMOV, W. M., JAKUZENJ, W. P., BABUSCHKIN, W. D., PAUKER, N. G., ALBUL, S. P., WOLODJKO, I. F., ASATUR, K. G., DAWIDOWITSCH, W. I., REZNIKOW, A. A., TOLSTICHIN, H. I., PLOTNIKOW, N. A., BONDARENKO, S. S., MATWEEWA, E. S., SCHERBAKOW, A. W., KERKIS, E. E., LECHTIMJAKI, E. W., OSTROUMOW, B. P., PLOTNIKOW, N. I., MERSCHALOW, A. F., KLIMENTOW, P. P., KIRJUCHIN, W. A., KAZ, D. M., KONOPLJANZEW, A. A., NOWOSCHILOW, W. N., ABRAMOW, S. K.,

- KRASILJNİKOWA, N. P., LJUBOMIROW, B. N., KRUGLIKOW, N. M., SOKOLOW, I. J., OGILJWI, A. A., MATWEEW, B. K., ONIN, N. M., JAKOWLEW, A. M., MOTSCHULJSKII, T. L., PERESUNJKO, D. I., CHITROW, I. N. (1967): Sprawotschnoe Rukowodstwo Gidrogeologa, **1** . - 580 S.; Leningrad (Nedra).
- MANN, S. & WEDEKIND, C. (2010): Die Flutung des Wismut-Bergbaus am Standort Dresden-Gittersee unter Berücksichtigung des historischen Steinkohlenbergbaus sowie vorhandenen Altlasten - ein Rückblick. - In: MEIER, G., SROKA, A, LÖBEL, K.-H., KLAPPERICH, H., TONDERA, D., BUSCH, W., MOSER, P. & MAYER, G. (Hrsg.): 10. Altbergbaukolloquium vom 4.–6. November 2010 in Freiberg, 177–188, 9 Abb.; Essen (Glückauf).
- MARZILGER, A. B. K. (2005): Das Ausgasungsverhalten von Steinkohlenbergwerken unmittelbar nach Stilllegung am Beispiel des Bergwerks Westfalen. - Dissertation, RWTH Aachen, 127 S.; Aachen.
- MEI, D., HE, Y.-L., LIU, S., YAN, J. & TU, X. (2015): Optimization of CO₂ conversion in a cylindrical dielectric barrier discharge reactor using design of experiments. - Plasma Processes and Polymers, **13** (5): 544–556, 9 Abb., 5 Tab.
- MELCHERS, C., WESTERMANN, S. & REKER, B. (2019): Evaluierung von Grubenwasseranstiegsprozessen im Ruhrgebiet, Saarland, in Ibbenbüren sowie weiteren deutschen Steinkohlenrevieren und dem angrenzenden europäischen Ausland. - 130 S., 60 Abb., 5 Tab.; Bochum (Selbstverlag des Deutschen Bergbau-Museums Bochum).
- MEßER, J. (2013): Ein vereinfachtes Verfahren zur Berechnung der flächendifferenzierten Grundwasserneubildung in Mitteleuropa. - Internetseite der Lippe Wassertechnik GmbH, Essen, www.gwneu.de (zuletzt geprüft am 4.2.2019).
- MICHEL, G. (1963): Untersuchungen über die Tiefenlage der Grenze Süßwasser-Salzwasser im nördlichen Rheinland und anschließenden Teilen Westfalens, zugleich ein Beitrag zur Hydrogeologie und Chemie des tiefen Grundwassers. - Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, **1239**: 131 S., 12 Abb., 10 Tab., 8 Anl.; Köln, Opladen (Westdeutscher Verlag).
- MÜHLENBECK, H. (2015): Hebungen nach Einstellung von Wasserhaltungen im Ruhrgebiet. - bergbau, **8**: 346–349, 7 Abb., 2 Tab.
- MURAWSKI, H. & MEYER, W. (2010): Geologisches Wörterbuch. - 12 Aufl., 220 S., 82 Abb.; Heidelberg, Berlin (Springer).
- MURPHY, K. C., WHITEHEAD, J., FALAHEE, P. C., ZHOU, D., SIMON, S. I. & LEACH, J. K. (2017): Multifactorial experimental design to optimize the anti-inflammatory and proangiogenic potential of mesenchymal stem cell spheroids. - Stem Cells, **35**:1493–1504, 8 Abb., 1 Tab.
- NAISHADHAM, K. (2010): Design of experiments as a microwave CAD tool. - Microwave and optical technology letters, **52** (5): 1020–1024, 2 Abb., 4 Tab.

- ORDÓÑEZ, A., JARDÓN, S., ÁLVAREZ, R., ANDRÉS, C. & PENDÁS, F. (2012): Hydrogeological definition and applicability of abandoned coal mines as water reservoirs. - J. Environ. Monit., **14**: 2.127–2.136, 8 Abb.
- PAAS, N. (1997): Untersuchungen zur Ermittlung der geochemischen Barriere von Gesteinen aus dem Umfeld untertägiger Versatzräume im Steinkohlenbergbau des Ruhrkarbons. - DMT-Berichte aus Forschung und Entwicklung, **54**: 234 S., 105 Abb., 43 Tab.; Bochum.
- PAUL, M., SÄNGER, H.-J., SNAGOWSKI, S., MÄRTEN, H. & ECKART, M. (1998): Flutungsprognose am Standort Ronneburg. Ergebnisse eines integrierten Modellansatzes. - Uranium Mining and Hydrogeology, **2**: 130–139, 5 Abb.; Freiberg.
- PLOTNIKOV, N. I. & ROGINETS, I. V. (1989): Hydrogeology of ore deposits. - Russian Translation Series, **72**: VIII + 290 S.; Rotterdam (A. A. Balkema).
- PRINZ, H. & STRAUß, R. (2018): Ingenieurgeologie. - 6 Aufl., 915 S.; Heidelberg, Berlin (Springer).
- RADHAKRISHNAN, V. K., DAVIS, V. A. & DAVIS, E. W. (2012): The effect of melt extrusion process parameters on rotary-evaporated poly(propylene) nanocomposites. - Macromol. Mater. Eng., **297** (9): 864–874, 8 Abb., 2 Tab.
- RAG AG (2014): Konzept zur langfristigen Optimierung der Grubenwasserhaltung der RAG Aktiengesellschaft für das Saarland gemäß § 4 Erblastenvertrag zur Bewältigung der Ewigkeitslasten des Steinkohlenbergbaus der RAG AG im Rahmen der sozialverträglichen Beendigung des subventionierten Steinkohlenbergbaus in Deutschland vom 14.08.2007. - 17 S., 8 Abb.; Herne.
- RAG ANTHRACIT IBBENBÜREN GMBH (2020): Wie soll das Grubenwasser in Zukunft abgeleitet werden? URL: <https://www.rag-anthrazit-ibbenbueren.de/grubenwasserhaltung/wie-soll-das-grubenwasser-in-zukunft-abgeleitet-werden/> (Abrufdatum: 23.04.2020).
- RENZI, P., KRONIG, C., CARLONE, A., ERÖKSÜZ, S., BERKESEL, A. & BELLA, M. (2014): Kinetic Resolution of Oxazinones: Rational Exploration of Chemical Space through the Design of Experiments. - Chem. Eur. J. 2014, **20**: 1–9, 3 Abb., 9 Tab.
- REUTHER, C.-D. (2018): Grundlagen der Tektonik. Kräfte und Spannungen der Erde auf der Spur. - 288 S.; Heidelberg, Berlin (Springer).
- REYNOLDS, O. (1883): An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinous and of the law of resistance in parallel Channels. - Phil. Trans. Royal Society London, **174/A**: 935–982.
- ROGOZ, M. (1978): Water capacity of abandoned working in underground coal mines. - Tagungsband der SIAMOS Konferenz in Granada, 1291–1301, 1 Abb., 1 Tab.; Granada.

- ROGOZ, M. & POSY EK, E. (2000): Hydrogeological problems connected with closure of mines in the Upper Silesian coal basin. - Tagungsband der 7. International Mine Water Association (IMWA) Konferenz in Ustron, 319–330, 3 Abb., 1 Tab.
- ROM, H. (1939): Grundwasserabsenkungen und Bewegungsvorgänge im Deckgebirge bei der Grundwasserentziehung. - Mitt. Markscheidewes., **50** (2): 113–148.
- ROSNER, P. (2011): Der Grubenwasseranstieg im Aachener und Südlimburger Steinkohlenrevier - eine hydrogeologisch-bergbauliche Analyse der Wirkungszusammenhänge. - Dissertation, RWTH Aachen, 194 S., 4 Anh., 7 Anl.; Aachen.
- ROSNER, P., HEITFELD, M., SPRECKELS, V. & VOSEN, P. (2014): Auswirkungen von Geländehebungen im Zuge des Grubenwasseranstiegs im Ruhrrevier. - Tagungsbeitrag am Ruhr-Geo Tag am 27. März 2014 in Bochum, 153–177, 14 Abb.
- RÜTERKAMP, P. & ECKART, M. (2011): Ermittlung der Auswirkungen des Grubenwasser-einstaus in den Deckgrundwasserleiter im Bereich Königsborn. - 46 S., 21 Abb., 1 Tab.; Essen (unveröffentl. Gutachten der DMT GmbH & Co. KG im Auftrag der RAG Aktiengesellschaft).
- RÜTERKAMP, P., HEWIG, R., DOMRÖS, M., FLÜCHTER, U. & PETTENPOHL, H. (2000): Hydrogeologisches Gutachten zu möglichen Auswirkungen des Grubenwasseranstiegs nach Einstellung der bergbaulichen Wasserhaltung des Steinkohlenbergwerks Westfalen. - 69 S., 2 Abb., 21 Tab., 1 Anh., 6 Anl.; Essen (unveröffentl. Gutachten der DMT GmbH & Co. KG im Auftrag der Deutschen Steinkohle AG).
- RUHRKOHLE BERGBAU AG (1995): Wasseranstieg Zeche Königsborn. Stellungnahme zum Stauvolumen. - 2 S.; Hamm.
- SADOVENKO, I. O. & RUDAKOV, D. V. (2010): Dynamics of mass transport with ground water flow when active and closing mining operations. - 216 S.
- SAMMARCO, O. (1995): Storage of water in the voids of abandoned mines and fractured rocks. - In: HOTCHKISS, W. R., DOWNEY, J. S., GUTENTAG, E. D. & MOORE & J. E.: Water resources at risk. - IMWA, 102–114, 4 Abb., 1 Tab.; Minneapolis (American Institute of Hydrology).
- SCHÄFER, A. (2016a): Das Grubenwasser im saarländischen Steinkohlenrevier nach dem Ende der Gewinnung. - bergbau, **4**: 172–176, 5 Abb.
- SCHÄFER, A. (2016b): Zur Verteilung der Bewegungen an der Tagesoberfläche nach Grubenwasseranstieg in einer Steinkohlenlagerstätte. - Markscheidewesen, **123** (1): 21–28, 8 Abb., 4 Tab.
- SCHIEFLER, E. (1997): Statistische Versuchsplanung und -auswertung. Eine Einführung für Praktiker. - 3. Aufl., 454 S., 128 Abb., 186 Tab.; Stuttgart (Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie).

- SCHULTZE, M., JOLAS, P. & WEBER, L. (2018): Filling, remediation and management of pit lakes by using mine water - an update. - In: DREBENSTEDT, C., VON BISMARCK, F., FOURIE, A. & TIBBETT, M. (Hrsg.): Tagungsband der 12. Mine Closure Konferenz vom 3.–7. September 2018 in Leipzig, 495–502, 3 Abb., 1 Tab.; Leipzig.
- SCHUMANN, W. (2016): Der große BLV Steine- und Mineralienführer. - 10 Aufl., 400 S.; München (BLV Buchverlag).
- SEMMLER, W. (1937): Untersuchungen, Wassermessungen und Färbungsversuche zur Ermittlung der Herkunft der Wasserzuflüsse im Felde der Grube Victoria. Püttlingen-Saar. - Der Bergbau, **50** (6): 87–93.
- SEMMLER, W. (1955): Die Grubenwasserzuflüsse im Ruhrbergbau und ihre Abhängigkeit von den Niederschlägen. - bergbau, **6** (8): 205–214.
- SHERWOOD, J. M. & YOUNGER, P. L. (1994): Modelling groundwater rebound after coalfield closure: An example from County Durham, United Kingdom. - Tagungsband der 5. International Mine Water Association (IMWA) Konferenz in Nottingham, 769–777, 4 Abb.
- SHERWOOD, J. M. (1997): Modelling minewater flow and quality changes after coalfield closure. - Dissertation, University of Newcastle upon Tyne, 241 S.
- SHERWOOD, J. M. & YOUNGER, P. L. (1997): Modelling groundwater rebound after coalfield closure. - In: CHILTON, P. J. (Hrsg.): Groundwater in the Urban Environment, **1**: Problems, Processes and Management, 165–170; Rotterdam (Balkema).
- SICHARDT, W. (1928): Das Fassungsvermögen von Rohrbrunnen und seine Bedeutung für die Grundwasserabsenkung, insbesondere für größere Absenkungstiefen. - 89 S., 40 Abb., 19 Tab.; Berlin (Springer).
- SIEBERTZ, K., VAN BEBBER, D. & HOCHKIRCHEN, T. (2017): Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE). - 2. Aufl., 508 S., 285 Abb., 100 Tab., 2 Anh.; Berlin (Springer).
- SOUARD, F., PERRIER, S., NOËL, C., FAVE, C., FIORE, E., PEYRIN, E., GARCIA, J. & VANHAVERBEK, C. (2015): Optimization of experimental parameters to explore small-ligand/aptamer interactions through use of ^1H NMR spectroscopy and molecular modeling. - Chem. Eur.J., **21**: 15740–15748, 6 Abb., 1 Tab.
- STAHEL, W. A. (2009): Statistische Datenanalyse. Eine Einführung für Naturwissenschaftler. - 5 Aufl., 418 S.; Wiesbaden (Vieweg+Teubner).
- STRUCKMEIER, W. (1990): Wasserhaushalt und hydrologische Systemanalyse des Münsterländer Beckens. - LWA Schriftenreihe, **45**: 71 S., 21 Abb., 13 Tab., 5 Kt.; Düsseldorf.
- THIEM, G. (1906): Hydrologische Methoden. - 56 S., 8 Abb.; Leipzig (Gebhardt).
- TRESKATIS, C. (2017): Bohrbrunnen: Planung, Ausbau, Betrieb. - 9. Aufl., 1046 S.; Essen (Vulkan).

- TSIKONIS, L., VANHERLE, J. & FAVRAT, D. (2011): Investigating reliability on fuel cell model identification. Part 1: A design of experiments approach. - *Fuel Cells*, **11** (6): 850–865, 19 Abb., 4 Tab.
- TUNGER, K. (2008): Untersuchungen zu Auswirkungen an der Tagesoberfläche nach Einstellung der Gewinnungstätigkeit Ende 1989 und Einleitung der Flutung im Mai 1995 am Beispiel des ehemaligen Bergbaubetriebes „Willi Agatz“ der SDAG Wismut. - Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg, 86 S., 46 Abb., 10 Tab.; Freiberg.
- USAKO (1991): Flutungskonzeption der Lagerstätte Freital/Gittersee. - 35 S., 10 Abb., mehrere Tab., 7 Anl.; Chemnitz (unveröffentl. Gutachten des Büros für Umweltsanierungskonzepte für die SDAG Wismut).
- USAKO (1993): Lagerstätte Freital/Gittersee. Flutungskonzeption mit Umweltbewertung des Wasserpfad. - 66 S., 10 Abb., 15 Tab., 9 Anl.; Chemnitz (unveröffentl. Gutachten des Büros für Umweltsanierungskonzepte für die SDAG Wismut).
- VOIGT, R. & DIERSCH, H.-J. G. (1999): GIS-basierte dreidimensionale Datenverwaltung, Visualisierung und Modellierung der Urangrube Königstein. - *GIS Geo-Informationssysteme* **12** (1): 20–25.
- VON STOSCH, M. & WILLIS, M. J. (2017): Intensified design of experiments for upstream bioreactors. - *Eng. Life Sci.*, **17**: 1173–1184
- VUTUKURI, V. S. & SINGH, R. N. (1995): Mine inundation - Case histories. - *Mine Water Env.*, **12** (1-4): 107-130, 12 Abb., 2 Tab.; Wollongong.
- WASSERHAUSHALTSGESETZ vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. Juli 2017 (BGBl. I S. 2771) geändert worden ist.
- WALTER, T. (2018): Grubenflutung im Saarland: das Verfahren aus Sicht der Wasserbehörde. - Vortrag auf der Tagung der Fachsektion Hydrogeologie e. V. in der DGGV (FH-DGGV) in Bochum am 22.3.2018, 16 S. (Präsentation); Bochum.
- WENDLAND, E., KORIES, H. & MEßER, J. (2002): Modelling groundwater flow in urban environment. - XXXII. IAH & VI. AHLSD - Groundwater and Human Development, Mar del Plata (Argentinien), 5 S., 6 Abb., 3 Tab.
- WESCHE, D. (2017): Analyse der hydrogeologischen Eigenschaften der Deckgebirgsschichten und Störungen im Münsterländer Kreidebecken auf Grundlage eines neuen integrierten 3D-Untergrundmodells. - Wissenschaftliche Schriftenreihe Geotechnik und Markscheidewesen. TU Clausthal, **25**: 359 S., 100 Abb., 27 Tab., 8 Anh.; Clausthal.
- WESTERMANN, S., RUDAKOV, D. V., REKER, B. & MELCHERS, C. (2018): Ein neuer Blick auf Grubenwasseranstiegsprozesse - ausgewählte Beispiele aus dem deutschen Steinkohlenbergbau. - In: MEIER, G., BENNDORF, J., LÖBEL, K.-H., BUTSCHER, C., TONDERA, D., BUSCH, W.,

- DZIURZYNSKI, W. & SROKA, A. (Hrsg.): 18. Altbergbaukolloquium vom 8.–10. November 2018 in Wieliczka, Polen: 61–75, 8 Abb., 2 Tab.; Nossen (Wagner Digitaldruck und Medien GmbH).
- WESTERMANN, S., RUDAKOV, D. V., WOLKERSDORFER, C. & MELCHERS, C. (2019): Design of Experiments. Ein systemanalytischer Ansatz für ein besseres Verständnis von Grubenwasseranstiegsprozessen in Untertagebergwerken. In: MAYER, G., BENNDORF, J., LÖBEL, K.-H., BUTSCHER, C., TONDERA, D. & BUSCH, W. (Hrsg.): 19. Altbergbaukolloquium vom 7.–9. November 2019 in Leoben, 81–93, 6 Abb., 4 Tab.; Nossen (Wagner Digitaldruck und Medien GmbH).
- WHITWORTH, K. R. (2002): The monitoring and modelling of mine water recovery in UK coalfields. - In: YOUNGER, P. L. & ROBINS, N. S. (Hrsg.): Mine water hydrogeology and geochemistry: 61–73; London (Geological Society London).
- WOLANSKY, D. (1952): Deckgebirgskarte i. M. 1 : 25.000 - Großblatt Oberaden; Dortmund (Willy Gröbchen KG).
- WOLANSKY, D. (1954): Deckgebirgskarte i. M. 1 : 25.000 - Großblatt Flierich; Dortmund (Willy Gröbchen KG).
- WOLANSKY, D. (1954): Deckgebirgskarte i. M. 1 : 25.000 - Großblatt Dolberg; Dortmund (Willy Gröbchen KG).
- WOLKERSDORFER, C. (1996): Hydrogeochemische Verhältnisse im Flutungswasser eines Uranbergwerks - die Lagerstätte Niederschlema, Alberoda. - Dissertation, TU Clausthal, 244 S.; Clausthal-Zellerfeld.
- WOLKERSDORFER, C. (2001): Tracer tests in flooded underground mines. - In: SEILER, K.-P. & WOHNLI, S. (Hrsg.): New approaches characterizing groundwater flow - Tagungsband der XXXI. International Association of Hydrogeologists (IAH) Konferenz vom 10.–14. September 2001 in München, 1: 229–233; Lisse (Balkema).
- WOLKERSDORFER, C. (2008): Water management at abandoned flooded underground mines. Fundamentals - Tracer Tests - Modelling - Water Treatment. - 465 S., zahlr. Abb. und Tab.; Heidelberg, Berlin (Springer).
- YOUNGER, P. L. (1997): The longevity of minewater pollution: a basis for decision-making. - The Science of the Total Environment, **194/195**: 457–466, 5 Abb.
- YOUNGER, P. L. (2000): Holistic remedial strategies for short- and long-term water pollution from abandoned mines. - Trans. Instn Min. Metall., **109**: 210–218, 5 Abb., 1 Tab.
- YOUNGER, P. L. & SHERWOOD, J. M. (1993): The cost of decommissioning a coalfield: Potential environmental problems in County Durham. - Mineral Planning, **57**: 26–29.
- YOUNGER, P. L. & ADAMS, R. (1999): Predicting Mine Water Rebound. - Research & Development Technical Report **W179**, 109 S.; Bristol (Environment Agency).

YOUNGER, P. L., BANWART, S. A. & HEDIN, R. S. (2002): Mine Water. Hydrology, Pollution, Remediation. - 464 S.; Dordrecht (Kluwer).

DIN-Normen

DIN 4049-1 (1992): Hydrologie - Teil 1: Grundbegriffe. - Berlin (Beuth).

DIN 4049-3 (1994): Hydrologie. Begriffe zur quantitativen Hydrologie - Teil 3: Unterirdisches Wasser. - Berlin (Beuth).

DIN 5485 (1986): Benennungsgrundsätze für physikalische Größen. Wortzusammensetzungen mit Eigenschafts- und Grundwörtern. - Berlin (Beuth).

DIN 18 130-1 (1998): Baugrund; Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts - Teil 1: Laborversuche. - Berlin (Beuth).

DIN EN ISO 80000-1 (2013): Größen und Einheiten - Teil 1: Allgemeines. - Berlin (Beuth).

11 Anhänge

Anhang 1: Geohydraulische Kenndaten für die Gesteine der Rheinisch-Westfälischen Steinkohlenlagerstätte.

Durchlässigkeitskoeffizienten der Gesteine des Oberkarbons (verändert nach BALTES et al. 1998).

Lithologie	Durchlässigkeitskoeffizient					
	vertikal [m/s]	verritzt Mittelwert [m/s]	horizontal [m/s]	vertikal [m/s]	unverritzt Mittelwert [m/s]	horizontal [m/s]
vorw. Schiefertone	-	1×10^{-9}	-	-	3×10^{-10}	-
Wechselfolge aus Schiefertone und Sandschiefer, mit Sandstein	-	3×10^{-9}	-	-	1×10^{-9}	-
vorw. Sandschiefer oder stark wechselnde Folgen	-	1×10^{-8}	-	-	3×10^{-9}	-
Wechselfolge aus Schiefertone und Sandsteinen	6×10^{-9}	1×10^{-8}	2×10^{-8}	2×10^{-9}	3×10^{-9}	4×10^{-9}
Wechselfolge aus vorw. Sandschiefern und Sandsteinen	1×10^{-8}	2×10^{-8}	4×10^{-8}	5×10^{-9}	6×10^{-9}	8×10^{-9}
Wechselfolge aus vorw. Sandsteinen und Sandschiefern	3×10^{-8}	1×10^{-7}	3×10^{-7}	6×10^{-9}	1×10^{-8}	2×10^{-8}
vorw. Sandstein, Bänke < 20 m Mächtigkeit	-	3×10^{-7}	-	-	3×10^{-8}	-
vorw. Sandstein, Bänke > 20 m Mächtigkeit	-	1×10^{-6}	-	-	1×10^{-7}	-

Gesamtporosität und Durchlässigkeitskoeffizienten der Gesteine des Deckgebirges (verändert nach JÄGER et al. 1990).

Stratigraphie		Gestein	Gesamtporosität n_p [-]	Durchlässigkeitskoeffizient k_f [m/s]
Quartär	nichtbindig (Terrassensande, -kiese, Decksande, fluvioglaz. Sande)		0,30 ... 0,35	1×10^{-6} ... 8×10^{-4}
	bindig (Tallehme, Lößlehm, Geschiebelehm)		0,30 ... 0,40	1×10^{-11} ... 5×10^{-7}
Tertiär	nichtbindig (Feinsande, Oligozän)		0,25 ... 0,30	5×10^{-7} ... 5×10^{-6}
	bindig (Schluffe)		0,25 ... 0,35	1×10^{-11} ... 1×10^{-8}
Kreide	Haltener Sande		0,25 ... 0,30	5×10^{-5} ... 2×10^{-4}
	Bottroper Mergel		0,30 ... 0,35	1×10^{-9} ... 5×10^{-7}
	Osterfelder Sande		0,24 ... 0,32	1×10^{-5}
	Recklinghäuser Sandmergel		0,25 ... 0,35	5×10^{-5} ... 8×10^{-5}
	Emscher-Mergel		0,10 ... 0,35	1×10^{-12} ... 1×10^{-4}
	Tonmergelsteine und Kalksteine		0,05 ... 0,15	keine Angabe
	Keuper, Muschelkalk (Kalksteine, Mergelsteine)		0,05 ... 0,30	keine Angabe
Trias	Buntsandstein (unverfestigte Fein- bis Mittelsande, verfestigte Ton- und Siltsteine)		0,28 ... 0,40	keine Angabe
	Ton- und Mergelsteine		ca. 0,1	1×10^{-12}
Zechstein	Kalksteine, Dolomite		< 0,1	keine Angabe
	Anhydrit		< 0,1	keine Angabe

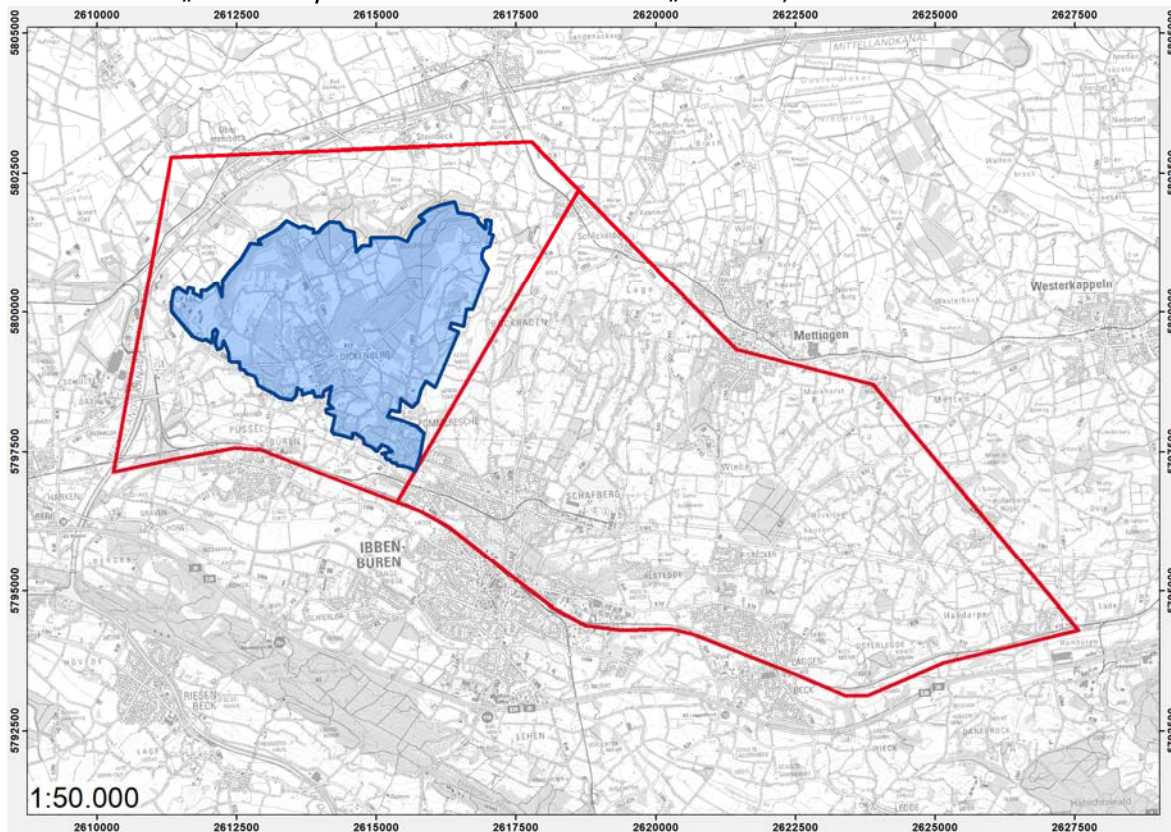
Abschnitt 11 – Anhänge

Durchlässigkeitskoeffizienten sowie effektive Porositäten der Poren und Klüfte der Gesteine des Deckgebirges (verändert nach BALTES et al. 1998).

Stratigraphie	Bemerkung	Durchlässigkeitskoeffizient k_f [m/s]	effektive Porosität (Poren) $n_{\text{peff,Pore}}$ [-]	effektive Porosität (Klüfte) $n_{\text{peff,Kluft}}$ [-]
Bottroper Mergel	allgemein	1×10^{-7}	keine Angabe	0,001 ... 0,005
	"Zentralbereich"	1×10^{-8}		< 0,001
Osterfelder Sande	Norden	1×10^{-4}	ca. 0,1	< 0,001
	Mitte	1×10^{-5}	ca. 0,06	< 0,001
	Süden	3×10^{-6}	ca. 0,03	< 0,001
Recklinghäuser Sandmergel	oberflächennah	3×10^{-6}	keine Angabe	0,005 ... 0,01
	"Mitte"	1×10^{-7}		< 0,005
	Basis	8×10^{-8}		< 0,001
Emscher-Mergel	oberflächennah	1×10^{-6}	keine Angabe	0,005 ... 0,008
	allgemein	1×10^{-10}		< 0,001
Emscher-Grünsand		1×10^{-8}	keine Angabe	< 0,001
Turon-/Cenoman-Kalkstein	bergbaulich beeinflusst	1×10^{-6}	keine Angabe	0,005 ... 0,015
	bergbaulich unbeeinflusst	1×10^{-7}		< 0,005 ... 0,01
Soester/Bochumer Grünsand	oberflächennah	3×10^{-7}	keine Angabe	0,005 ... 0,01
	allgemein	1×10^{-7}		< 0,005
Labiatus-Mergel (Turon-Kalkstein)	oberflächennah	1×10^{-6}	keine Angabe	0,005 ... 0,015
	allgemein	3×10^{-7}		0,005 ... 0,01
Essener Grünsand, Flammenmergel, Minimus-Grünsand	allgemein	3×10^{-8}	keine Angabe	< 0,005
	Essener Grünsand im Süden	1×10^{-8}		< 0,001
Buntsandstein		3×10^{-8}	ca. 0,03	< 0,005
Zechstein	ohne Riff	1×10^{-11}	keine Angabe	< 0,001
	Zechstein-Riff			0,01 ... 0,03

Anhang 2: Berechtsame und Umhüllende der Abbaubereiche.

Berechtsame und Umhüllende der Abbaubereiche des **Bergwerks Ibbenbüren** (im Nordwesten: Abbaubereich „Westfeld“; im Südosten: Abbaubereich „Ostfeld“).



Kenndaten des Bergwerks Ibbenbüren (nur Abbaubereich „Westfeld“)

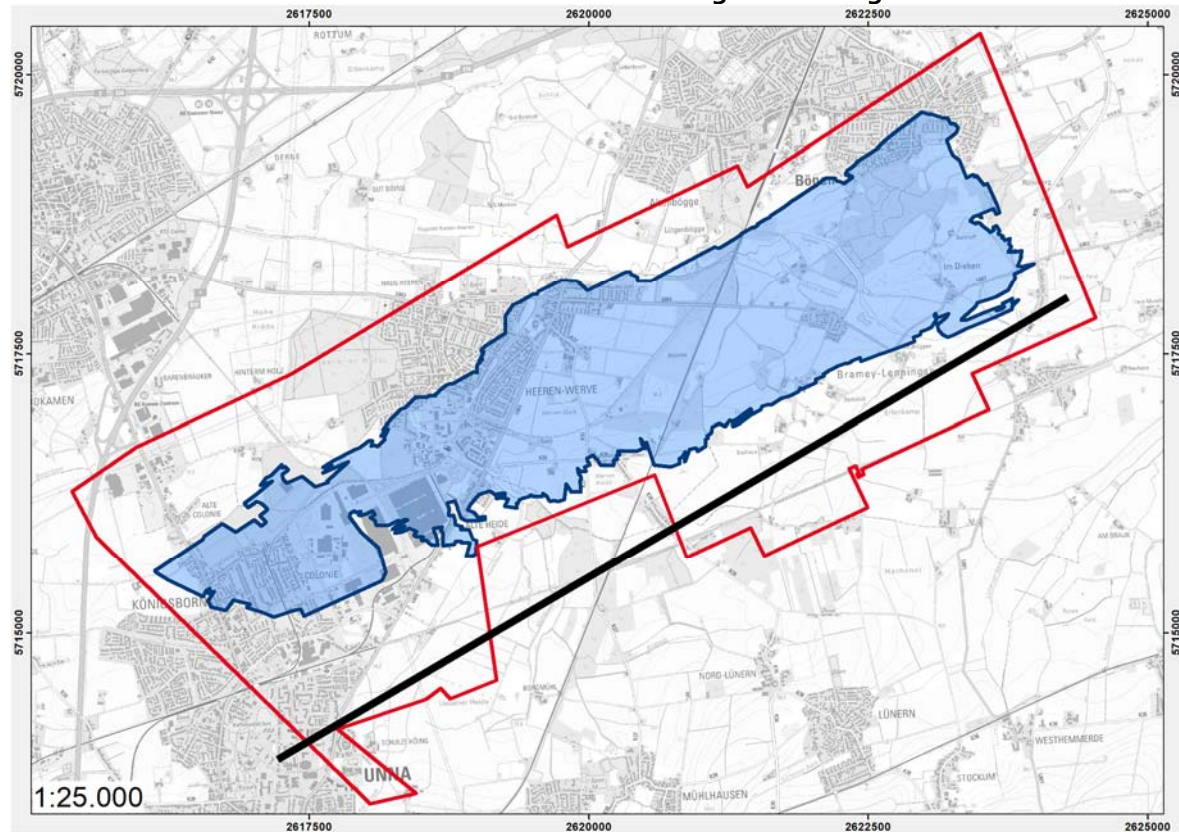
Flächengröße der Berechtsame A_B	37	km ²
Fläche der umhüllenden Abbaufäche $A_{U, \text{Abbau}}$	17	km ²

Legende

rote Umrandung: Berechtsame (Daten: RAG AG)
 blaue Fläche: Umhüllende der Abbaubereiche (Daten: BUSCH et al. 2016)

Abschnitt 11 – Anhänge

Berechtsame und Umhüllende der Abbaubereiche des Bergwerks Königsborn.



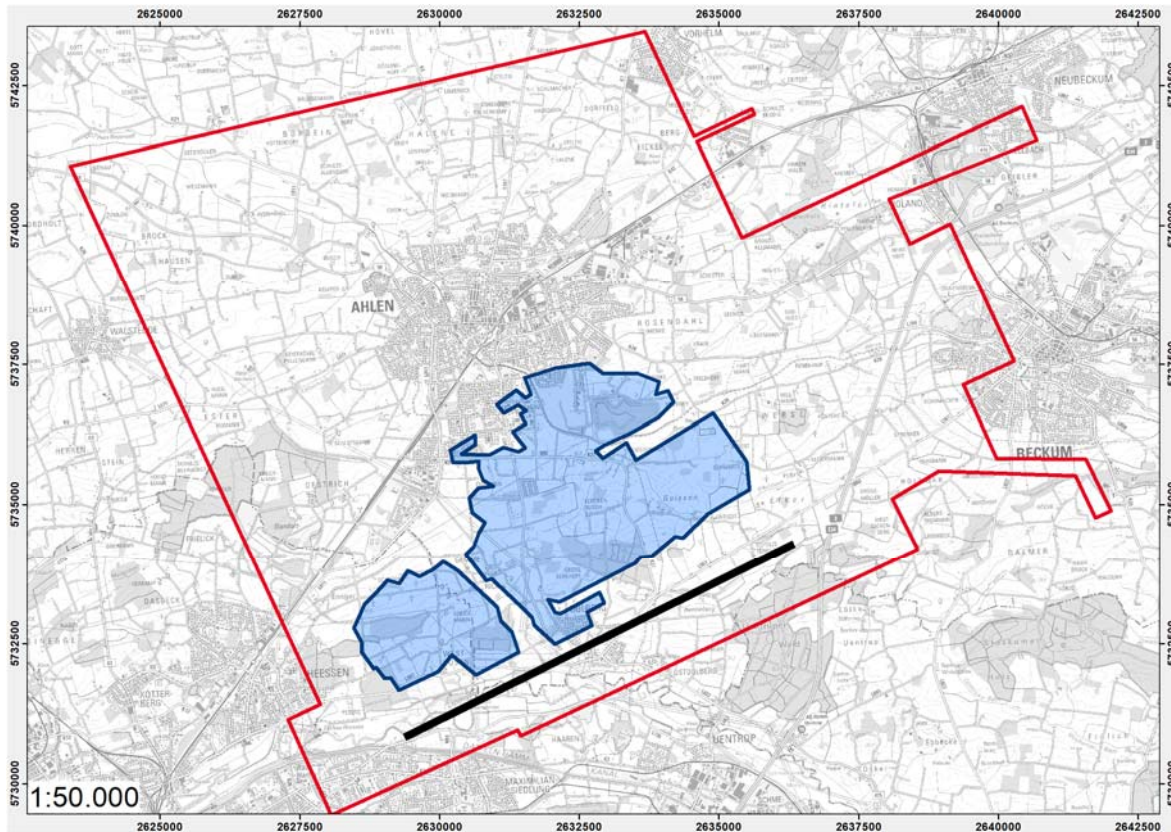
Kenndaten des Bergwerks Königsborn

Flächengröße der Berechtsame A_B	25	km ²
Fläche der umhüllenden Abbaufäche $A_{U, \text{Abbau}}$	11	km ²
Länge der Zustrombreite l_{Zufluss}	8,2	km

Legende

rote Umrandung:	Berechtsame (Daten: RAG AG)
blaue Fläche:	Umhüllende der Abbaubereiche (Daten: DMT GmbH & Co. KG)
schwarze Linie:	maximale Längsausdehnung der Umhüllenden der Abbaubereiche (= Zustrombreite)

Berechtsame und Umhüllende der Abbaubereiche des **Bergwerks Westfalen**.



Kenndaten des Bergwerks Westfalen

Flächengröße der Berechtsame A_B	140	km ²
Fläche der umhüllenden Abbaublache $A_{U, Abbau}$	16	km ²
Länge der Zustrombreite $l_{Zufluss}$	7,8	km

Legende

- rote Umrandung: Berechtsame (Daten: RAG AG)
- blaue Fläche: Umhüllende der Abbaubereiche (Daten: DMT GmbH & Co. KG mit Ergänzungen aus RÜTERKAMP et al. 2000)
- schwarze Linie: maximale Längsausdehnung der Umhüllenden der Abbaubereiche (= Zustrombreite)

Anhang 3: Auswertung der Schachtprofile hinsichtlich der Mächtigkeit der Schichten des Turonium und Cenomaniums.

Tabellarisches Schichtenverzeichnis des **Bergwerks Königsborn** (Schächte Königsborn 1, 2, 3 und 5: WOLANSKY 1952; WOLANSKY 1954. Schacht Königsborn 4: CLOSTERMANN et al. 1997).

	Schichtoberkante	Schichtunterkante	Schichtmächtigkeit
	Turonium und Cenomanium		
Schacht-Bez.	[m u. GOK]	[m u. GOK]	[m]
Königsborn 1	40	178	138
Königsborn 2 *	91	205	114
Königsborn 3 *	150	297	147
Königsborn 4	150	297	147
Königsborn 5	91	205	114
Arithm. Mittelwert			133

* Schächte Königsborn 2 und Königsborn 3 werden für die Ermittlung des arithmetischen Mittelwerts nicht berücksichtigt, da diese in unmittelbarer Nähe zum Schacht Königsborn 5 (siehe Schacht Königsborn 2) bzw. Schacht Königsborn 4 (siehe Schacht Königsborn 3) liegen und daher ein identisches Schichtenverzeichnis zu diesen Schächten aufweisen.

Tabellarisches Schichtenverzeichnis des **Bergwerks Westfalen** (RÜTERKAMP et al. 2000).

	Schichtoberkante	Schichtunterkante	Schichtmächtigkeit
	Turonium und Cenomanium		
Schacht-Bez.	[m u. GOK]	[m u. GOK]	[m]
Westfalen 1	625	888	263
Westfalen 2	625	888	263
Westfalen 3	571	835	264
Westfalen 4	570	812	242
Westfalen 5	610	887	277
Westfalen 6	562	795	233
Westfalen 7	537	799	262
Arithm. Mittelwert			258

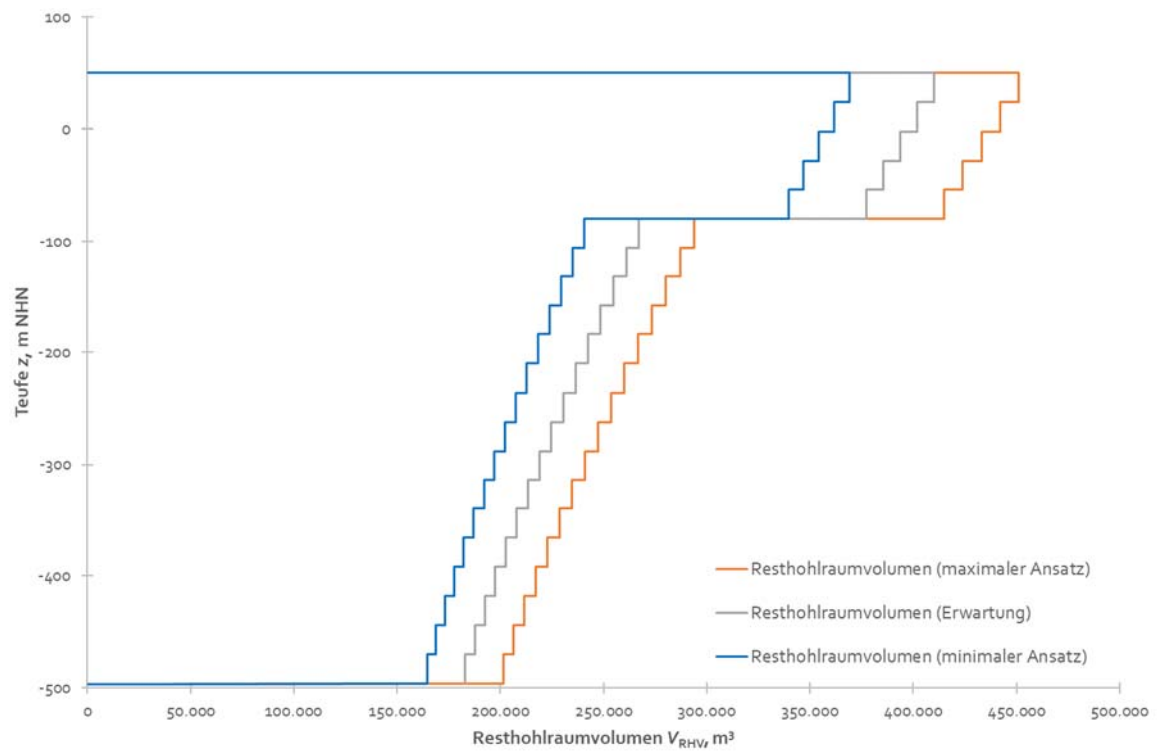
Anhang 4: Teufenspezifische Resthohlraumvolumina.

Tabelle der teufenspezifischen Verteilung der Resthohlraumvolumina des **Bergwerks Ibbenbüren** (nur Abbaubereich „Westfeld“; Daten: KORIES et al. 2017a).

Teufe		Resthohlraumvolumen
Z _{Sch,1}	Z _{Sch,2}	V _{RHV,gesamt}
von	bis	
[m NHN]	[m NHN]	[m³]
50	24	409.907
24	-2	401.791
-2	-28	393.630
-28	-54	385.439
-54	-80	377.238
-80	-106	267.165
-106	-132	260.936
-132	-158	254.739
-158	-184	248.586
-184	-210	242.491
-210	-236	236.466
-236	-262	230.526
-262	-288	224.683
-288	-314	218.950
-314	-340	213.341
-340	-366	207.869
-366	-392	202.547
-392	-418	197.389
-418	-444	192.407
-444	-470	187.616
-470	-496	183.027
Summe		5.536.743

Abschnitt 11 – Anhänge

Graphische Darstellung der vertikalen Verteilung der Resthohlraumvolumina des **Bergwerks Ib-benbüren** (Erwartung: Angaben aus KORIES et al. 2017a; maximaler Ansatz: Angaben gem. Tabelle zuzüglich 10 %; minimaler Ansatz: Angaben gem. Tabelle abzüglich 10 %).



Abschnitt 11 – Anhänge

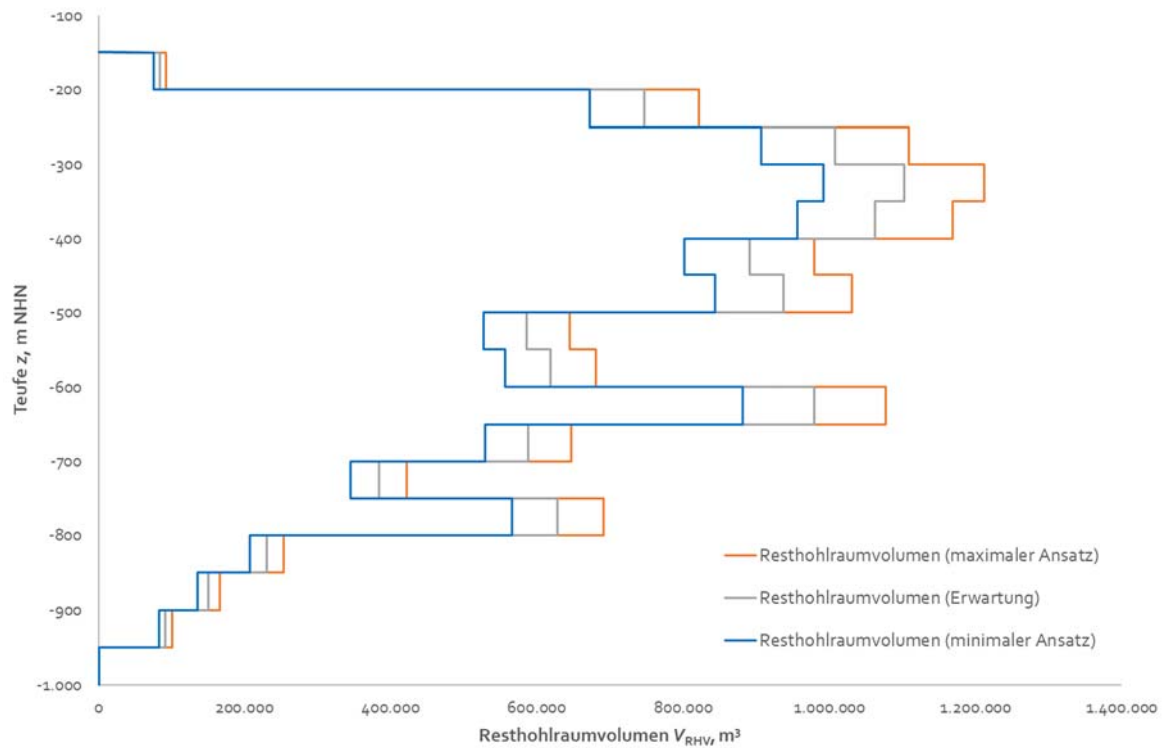
Tabelle der teufenspezifischen Verteilung der Resthohlraumvolumina des **Bergwerks Königsborn** (Daten: RAG AG).

Teufe		Resthohlraumvolumen	
Z _{Sch,1} von [m NHN]	Z _{Sch,2} bis [m NHN]	V _{RHV,Abbau} nur Abbau [m³]	V _{RHV,gesamt} Abbau, zzgl. Strecken [m³]
-150	-200	76.218	83.840
-200	-250	678.752	746.627
-250	-300	916.365	1.008.001
-300	-350	1.001.796	1.101.976
-350	-400	965.773	1.062.350
-400	-450	809.677	890.644
-450	-500	851.854	937.039
-500	-550	532.724	585.996
-550	-600	562.352	618.587
-600	-650	890.335	979.369
-650	-700	534.396	587.835
-700	-750	348.559	383.415
-750	-800	571.293	628.422
-800	-850	209.369	230.306
-850	-900	137.072	150.779
-900	-950	83.372	91.709
-950	-1.000	805	886
Summe		9.170.711	10.087.782

Bemerkung: zzgl. 10 % für Strecken- und Schachtvolumen

Abschnitt 11 – Anhänge

Graphische Darstellung der vertikalen Verteilung der Resthohlraumvolumina des **Bergwerks Königsborn** (Erwartung: Daten: RAG AG; maximaler Ansatz: Angaben gem. Tabelle zuzüglich 10 %; minimaler Ansatz: Angaben gem. Tabelle abzüglich 10 %).



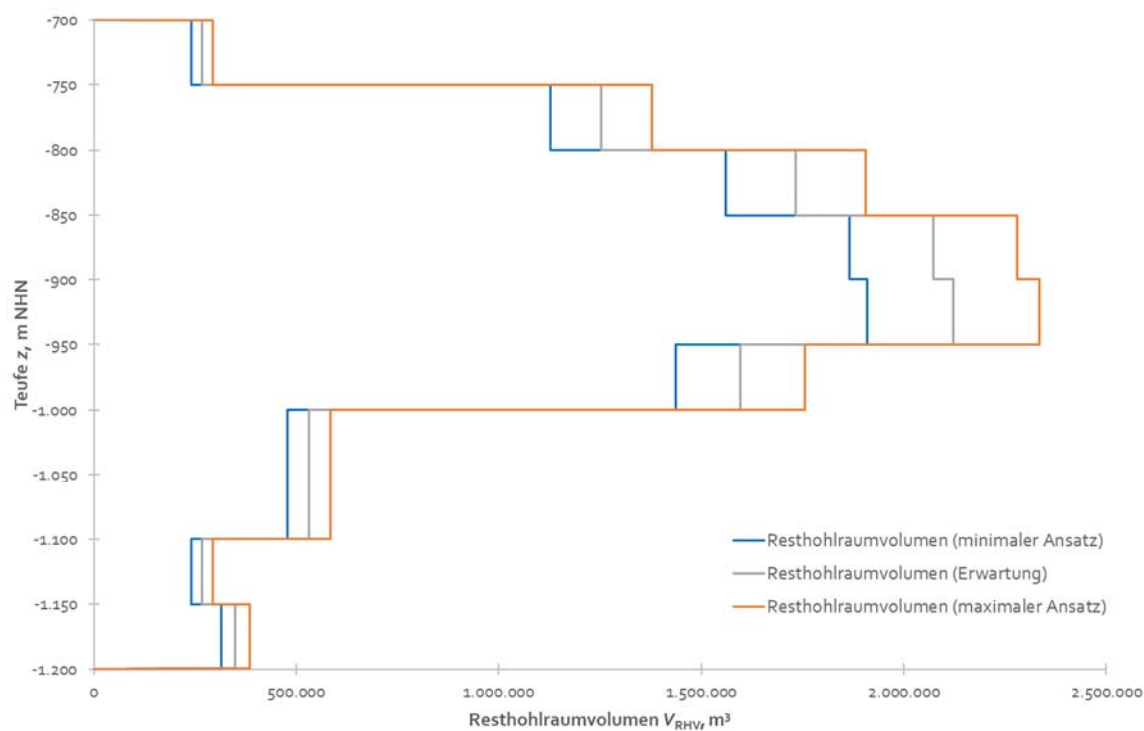
Abschnitt 11 – Anhänge

Tabelle der teufenspezifischen Verteilung der Resthohlraumvolumina des **Bergwerks Westfalen** (Daten: RAG AG).

Teufe		Resthohlraumvolumen	
Z _{Sch,1} von [m NHN]	Z _{Sch,2} bis [m NHN]	V _{RHV,Abbau} nur Abbau [m³]	V _{RHV,Abbau} Abbau, zzgl. Strecken [m³]
-700	-750	242.529	266.782
-750	-800	1.138.655	1.252.520
-800	-850	1.575.075	1.732.583
-850	-900	1.884.581	2.073.039
-900	-950	1.929.623	2.122.586
-950	-1.000	1.451.307	1.596.437
-1.050	-1.100	483.200	531.520
-1.100	-1.150	242.399	266.638
-1.150	-1.200	317.570	349.327
Summe		9.264.939	10.191.433

Bemerkung: zzgl. 10 % für Strecken- und Schachtvolumen

Graphische Darstellung der vertikalen Verteilung der Resthohlraumvolumina des **Bergwerks Westfalen** (Erwartung: Daten: RAG AG; maximaler Ansatz: Angaben gem. Tabelle zuzüglich 10 %; minimaler Ansatz: Angaben gem. Tabelle abzüglich 10 %).



Anhang 5: Teufenspezifische Verteilung der Durchlässigkeitskoeffizienten (nach JÄGER et al. 1990 und BALTES et al. 1998).

Tabelle der teufenspezifischen Verteilung der Durchlässigkeitskoeffizienten des **Bergwerks Ibbenbüren**.

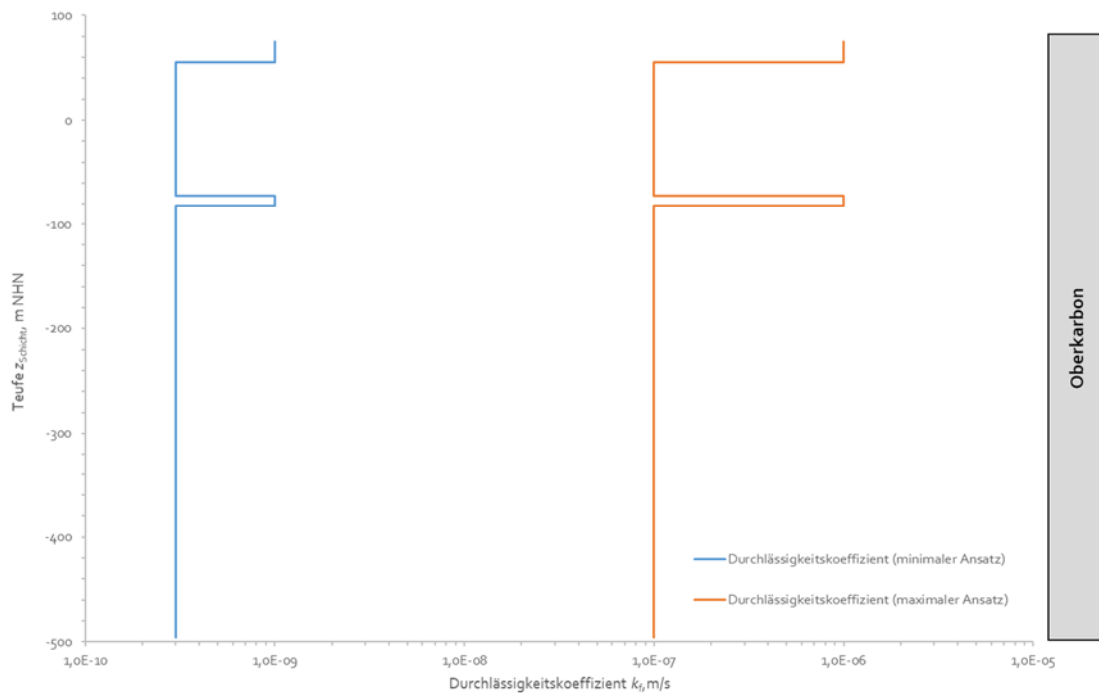
Grubenwasserstand zu Beginn des Grubenwasseranstiegs: -504 m NHN (März 1980)
Grubenwasserstand zum Ende des Grubenwasseranstiegs: 66 m NHN (Dezember 1982)

Schichtenaufbau	Teufe		Schichtmächtigkeit h_M	Durchlässigkeitskoeffizient		Transmissivitätskoeffizient	
	$Z_{Sch,1}$ von [m NHN]	$Z_{Sch,2}$ bis [m NHN]		$k_{f,min}$ Minimum [m/s]	$k_{f,max}$ Maximum [m/s]	$T_{Gw} = k_{f,min} \times h_M$ Minimum [m²/s]	$T_{Gw} = k_{f,max} \times h_M$ Maximum [m²/s]
Oberkarbon (verritzt)	75,0	55,0	11,0*	1,0E-09	1,0E-06	1,1E-08	1,1E-05
Oberkarbon (unverritzt)	55,0	-72	127,0	3,0E-10	1,0E-07	3,8E-08	1,3E-05
Oberkarbon (verritzt)	-72,0	-82,0	10,0	1,0E-09	1,0E-06	1,0E-08	1,0E-05
Oberkarbon (unverritzt)	-82,0	-496,0	414,0	3,0E-10	1,0E-07	1,2E-07	4,1E-05
			Σh_M [m]			$\Sigma T_{Gw,min}$ [m²/s]	$\Sigma T_{Gw,max}$ [m²/s]
			562,0			1,8E-07	7,5E-05
				$\bar{k}_{f,min}$ [m/s]	$\bar{k}_{f,max}$ [m/s]		
				3,3E-10	1,3E-07		
				\bar{k}_f [m/s]			
				6,7E-08		(arithmetischer Mittelwert)	

Bemerkungen:

* Mächtigkeit bis Grubenwasserstand zum Ende des Grubenwasseranstiegs (66 m NHN)

Graphische Verteilung der teufenspezifischen Verteilung der Durchlässigkeitskoeffizienten des **Bergwerks Ibbenbüren**.



Abschnitt 11 – Anhänge

Tabelle der teufenspezifischen Verteilung der Durchlässigkeitskoeffizienten des Bergwerks Königsborn.

Grubenwasserstand zu Beginn des Grubenwasseranstiegs
Aktueller Grubenwasserstand:

-894 m NHN (September 1996)
53 m NHN (Juni 2019)

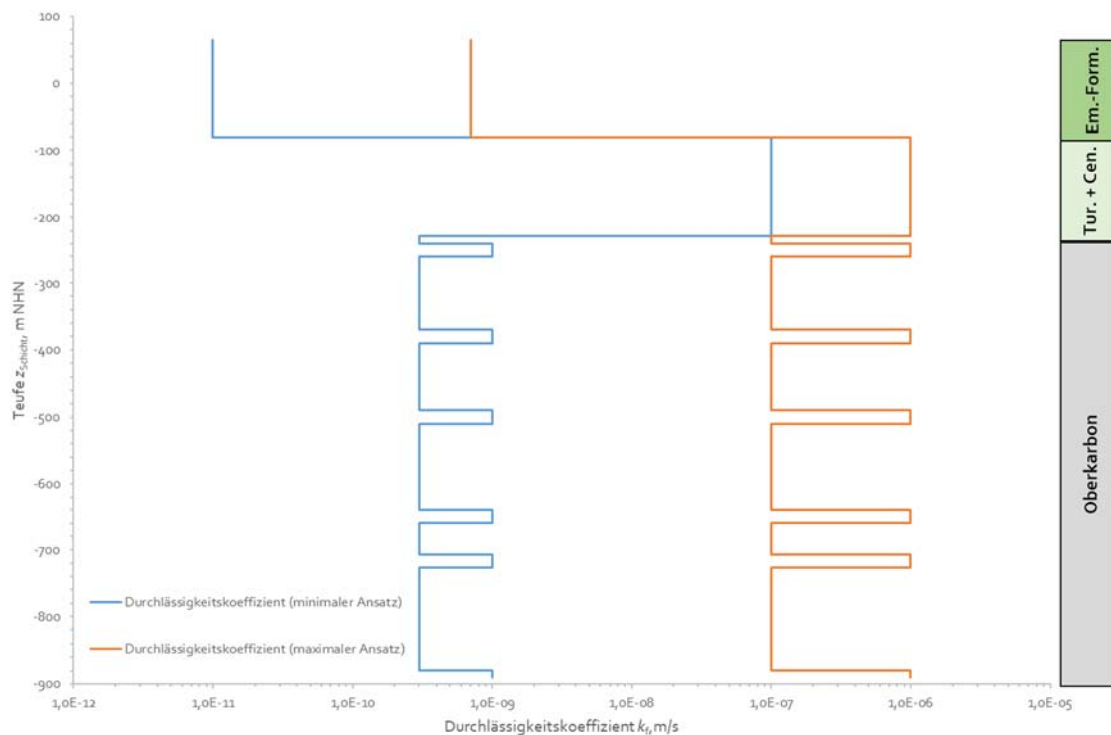
Schichtenaufbau (Schacht Königsborn 4)	Teufe		Schichtmächtigkeit	Durchlässigkeitskoeffizient		Transmissivitätskoeffizient	
	$Z_{Sch,1}$ von	$Z_{Sch,2}$ bis	h_M	$k_{f,min}$ Minimum	$k_{f,max}$ Maximum	$T_{GW} = k_{f,min} \times h_M$ Minimum	$T_{GW} = k_{f,max} \times h_M$ Maximum
	[m NHN]	[m NHN]	[m]	[m/s]	[m/s]	[m²/s]	[m²/s]
Emscher-Formation	65,0	-81,0	134,0*	1,0E-11	7,0E-10	1,3E-09	9,4E-08
Turonium, Cenomanium	-81,0	-218,0	137,0	1,0E-07	1,0E-06	1,4E-05	1,4E-04
Grünsand	-218,0	-228,0	10,0	1,0E-07	1,0E-06	1,0E-06	1,0E-05
Oberkarbon (unverritzt)	-228,0	-240,0	12,0	3,0E-10	1,0E-07	3,6E-09	1,2E-06
Oberkarbon (verritzt)	-240,0	-260,0	20,0	1,0E-09	1,0E-06	2,0E-08	2,0E-05
Oberkarbon (unverritzt)	-260,0	-370,0	110,0	3,0E-10	1,0E-07	3,3E-08	1,1E-05
Oberkarbon (verritzt)	-370,0	-390,0	20,0	1,0E-09	1,0E-06	2,0E-08	2,0E-05
Oberkarbon (unverritzt)	-390,0	-490,0	100,0	3,0E-10	1,0E-07	3,0E-08	1,0E-05
Oberkarbon (verritzt)	-490,0	-510,0	20,0	1,0E-09	1,0E-06	2,0E-08	2,0E-05
Oberkarbon (unverritzt)	-510,0	-640,0	130,0	3,0E-10	1,0E-07	3,9E-08	1,3E-05
Oberkarbon (verritzt)	-640,0	-660,0	20,0	1,0E-09	1,0E-06	2,0E-08	2,0E-05
Oberkarbon (unverritzt)	-660,0	-707,0	47,0	3,0E-10	1,0E-07	1,4E-08	4,7E-06
Oberkarbon (verritzt)	-707,0	-727,0	20,0	1,0E-09	1,0E-06	2,0E-08	2,0E-05
Oberkarbon (unverritzt)	-727,0	-880,0	153,0	3,0E-10	1,0E-07	4,6E-08	1,5E-05
Oberkarbon (verritzt)	-880,0	-890,0	10,0**	1,0E-09	1,0E-06	1,4E-08	1,4E-05
			$\sum h_M$ [m]			$\sum T_{GW,min}$ [m²/s]	$\sum T_{GW,max}$ [m²/s]
Summe:			947,0			1,5E-05	3,2E-04
				$\bar{k}_{f,min}$ [m/s]	$\bar{k}_{f,max}$ [m/s]		
				1,6E-08	3,3E-07		
				\bar{k}_f [m/s]			
				3,0E-08	(harmonischer Mittelwert)		

Bemerkungen:

* Mächtigkeit bis zum aktuellen Grubenwasserstand (53 m NHN)

** Mächtigkeit bis Grubenwasserstand zu Beginn des Grubenwasseranstiegs (-894,08 m NHN)

Graphische Verteilung der teufenspezifischen Verteilung der Durchlässigkeitskoeffizienten des Bergwerks Königsborn.



Abschnitt 11 – Anhänge

Tabelle der teufenspezifischen Verteilung der Durchlässigkeitskoeffizienten des Bergwerks Westfalen.

Grubenwasserstand zu Beginn:

-1.178 m NHN (September 2000)

Aktueller Grubenwasserstand:

-222 m NHN (Juni 2019)

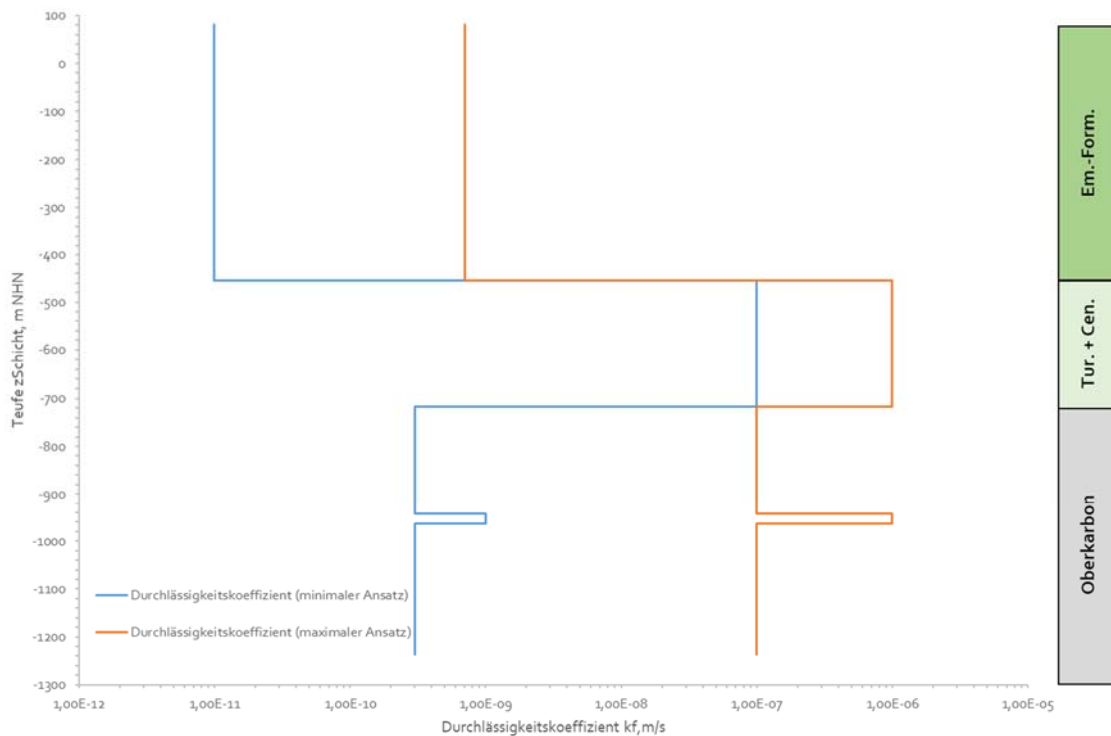
Schichtenaufbau (Schacht Westfalen 7)	Teufe		Schichtmächtigkeit h_M	Durchlässigkeitskoeffizient		Transmissivitätskoeffizient	
	$Z_{Sch,1}$	$Z_{Sch,2}$		$k_{f,min}$	$k_{f,max}$	$T_{Gw} = k_{f,min} \times h_M$	$T_{Gw} = k_{f,max} \times h_M$
	von [m NHN]	bis [m NHN]		Minimum [m/s]	Maximum [m/s]	Minimum [m²/s]	Maximum [m²/s]
Emscher-Formation	81,9	-454,5	232,5*	1,0E-11	7,0E-10	2,3E-09	1,6E-07
Turonium, Cenomanium	-454,5	-713,9	259,4	1,0E-07	1,0E-06	2,6E-05	2,6E-04
Grünsand	-713,9	-716,8	2,8	1,0E-07	1,0E-06	2,8E-07	2,8E-06
Oberkarbon (unverritzt)	-716,8	-942,7	226,0	3,0E-10	1,0E-07	6,8E-08	2,3E-05
Oberkarbon (verritzt)	-942,7	-962,7	20,0	1,0E-09	1,0E-06	2,0E-08	2,0E-05
Oberkarbon (unverritzt)	-962,7	-1.237,7	215,5**	3,0E-10	1,0E-07	6,5E-08	2,2E-05
			Σh_M [m]			$\Sigma T_{Gw,min}$ [m²/s]	$\Sigma T_{Gw,max}$ [m²/s]
			956,2			2,6E-05	3,3E-04
				$\bar{k}_{f,min}$ [m/s]	$\bar{k}_{f,max}$ [m/s]		
				2,8E-08	3,4E-07		
				\bar{k}_f [m/s]			
				5,1E-08		(harmonischer Mittelwert)	

Bemerkungen:

* Mächtigkeit bis zum aktuellen Grubenwasserstand (-222 m NHN)

** Mächtigkeit bis Grubenwasserstand zu Beginn (-1.178,20 m NHN)

Graphische Verteilung der teufenspezifischen Verteilung der Durchlässigkeitskoeffizienten des Bergwerks Westfalen.

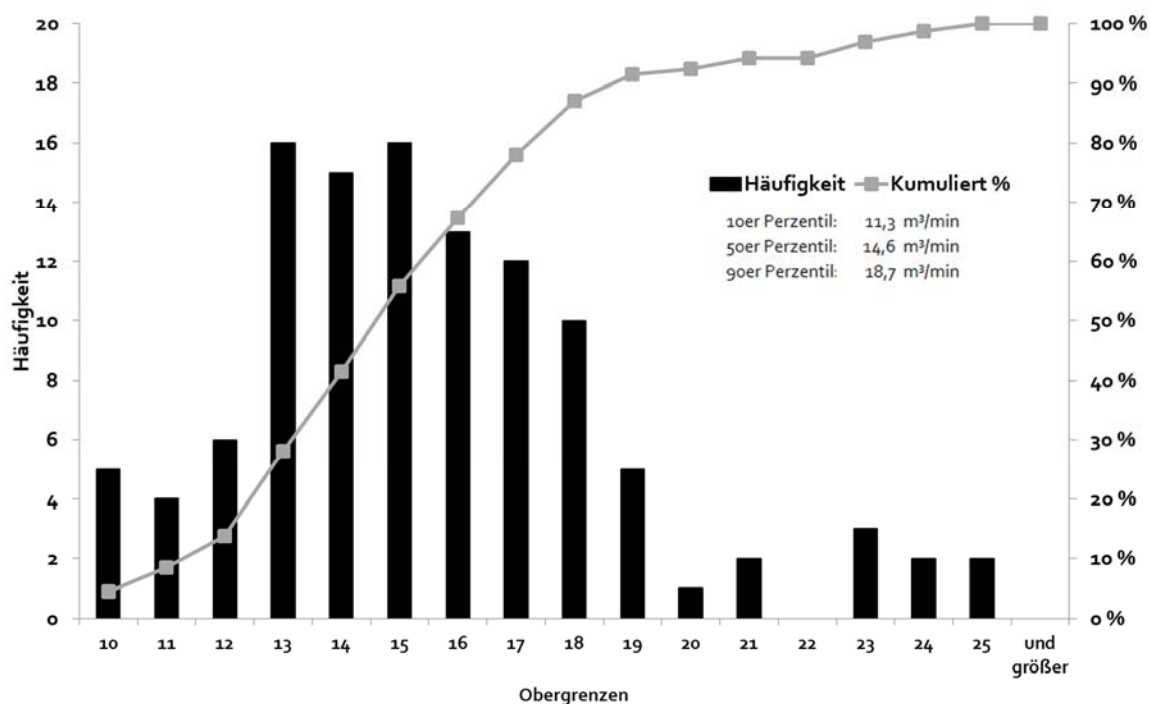


Anhang 6: Statistische Auswertung der geförderten Grubenwassermengen (1970–1979) und der Abflussraten des Dickenberger Stollens (1983–2014) des Bergwerks Ibbenbüren (Abbaubereich „Westfeld“).

Geförderte Grubenwassermengen (1970–1979; Daten: DMT GmbH & Co. KG).

Obergrenzen	Häufigkeit	Kumuliert %
10	5	4,46
11	4	8,46
11,3		10,00
12	6	13,82
13	16	28,11
14	15	41,50
14,6		50,00
15	16	55,79
16	13	67,39
17	12	78,11
18	10	87,04
18,7		90,00
19	5	91,50
20	1	92,39
21	2	94,18
22	0	94,18
23	3	96,86
24	2	98,64
25	2	100,00
und größer	0	100,00

von oben oben nach unten: 10er/50er/90er Perzentil

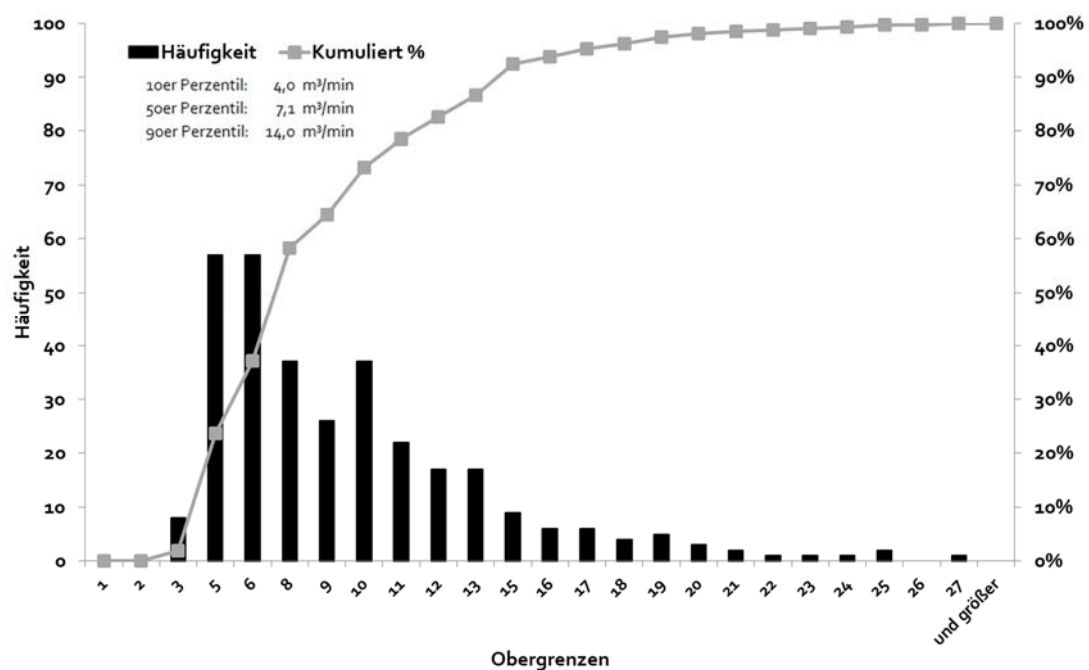


Abschnitt 11 – Anhänge

Abflussraten des Dickenberger Stollens (1983–2014; Daten; DMT GmbH & Co. KG).

<i>Obergrenzen</i>	<i>Häufigkeit</i>	<i>Kumuliert %</i>
1	0	0,0%
2	0	0,0%
3	8	1,9%
4	34	10,0%
5	57	23,6%
6	57	37,1%
7	52	49,5%
8	37	58,3%
9	26	64,5%
10	37	73,3%
11	22	78,6%
12	17	82,6%
13	17	86,7%
14	15	90,2%
15	9	92,4%
16	6	93,8%
17	6	95,2%
18	4	96,2%
19	5	97,4%
20	3	98,1%
21	2	98,6%
22	1	98,8%
23	1	99,0%
24	1	99,3%
25	2	99,8%
26	0	99,8%
27	1	100,0%
und größer	0	100,0%

von oben nach unten: 10er/50er/90er Perzentil



Anhang 7: Wertespannbreiten der Infiltrationsspenden, die den Bergwerken Westfalen und Königsborn über die Schichten des Turoniums und Cenomaniums abfließen.

	Einheit	Bergwerk Westfalen			Bergwerk Königsborn		
		min	mittel	max	min	mittel	max
Einfallen der Schichten	[°]	1	3	5	1	3	5
	[rad]	1,7E-02	5,2E-02	8,7E-02	1,7E-02	5,2E-02	8,7E-02
Gefälle i	[1]	0,02	0,05	0,09	0,02	0,05	0,09
Länge l_{Zufluss} der Anstromseite	[m]		7.800			8.200	
Mächtigkeit $h_{\text{M,T+C}}$ des Turoniums und Cenomaniums	[m]		258			133	
Durchströmte Fläche $A_{\text{T+C}}$ des Turoniums und Cenomaniums	[m ²]		2.012.400			1.090.600	
Durchlässigkeitskoeffizient $k_{\text{f,T+C}}$ des Turoniums und Cenomaniums	[m/s]	1,0E-07	1,8E-07	1,0E-06	1,0E-06	1,8E-07	1,0E-06
Zuflussrate $\dot{V}_{\text{T+C}}$ über das Turonium und Cenomanium	[m ³ /s]	0,0035	0,0191	0,1754	0,0019	0,0104	0,0951
	[m ³ /d]	303	1.654	15.154	164	897	8.212
erwartete Einflussreichweite	[m]		8.690			5.357	
erwartete Fläche des Einflussbereiches A_{E}	[m ²]		237.240.825			90.155.695	
Infiltrationsspende aus Turonium und Cenomanium in das Grubengebäude	[m/d]	1,3E-06	7,0E-06	6,4E-05	1,8E-06	9,9E-06	9,1E-05
Infiltrationsspende aus Emscher-Formation in das Grubengebäude	[m/d]		1,7E-06			1,7E-06	
Gesamt-infiltrationsspende	[m/d]	3,0E-06	8,7E-06	6,6E-05	3,5E-06	1,2E-05	9,3E-05

Anhang 8: Orientierende Ermittlung der Reichweiten der hydraulisch wirksamen Einflussbereiche mittels des iterativen Verfahrens nach KERKIS (1955).

	Formel- zeichen	Einheit	Bergwerk Ibbenbüren	Bergwerk Königsborn	Bergwerk Westfalen
Fläche der umhüllenden Abbaufläche	$A_{U,Abbau}$	[m ²]	16.810.950	11.030.000	15.973.994
Radius der umhüllenden Abbaufläche (minimale Reichweite)	$l_{U,Abbau}$	[m]	2.313	1.874	2.255
Resthohlraumvolumen	V_{RHH}	[m ³]	5.536.743	10.087.782	10.191.433
vertikale Abbauhöhe	$h_{M,Abbau}$	[m]	546	850	500
mittleres Resthohlraumvolumen je m	A_{RHH}	[m ³ /m]	10.141	11.868	20.383
mittlerer Ausdehnung des Grubengebäudes	l_{GG}	[m]	57	61	81
Grubenwasserstand zu Beginn	$h_{Gbw,0}$	[m NHN]	-496	-894	-1.178
aktueller Grubenwasserstand	$h_{Gbw,akt}$	[m NHN]	66	53	-222
natürlicher Grundwasserstand	h_{GW}	[m NHN]	66	80	80
Druckdifferenz zwischen Grund- und Grubenwasser	Δh	[m]	562	974	1.258
Durchlässigkeitskoeffizient	k_f	[m/s]	6,7E-08	3,0E-08	5,1E-08
		[m/d]	5,8E-03	2,6E-03	4,4E-03
mittlere Infiltrationsspende	$\dot{h}_{Inf,ges}$	[m/d]	3,6E-04	1,2E-05	8,7E-06
Absenkungsbetrag	h_s	[m]	562	947	956
	l_{E0}	[m]	1.000	7.000	12.000
	l_{E1}	[m]	1.466	6.963	12.969
Iterative Annäherung der Einflussreichweite	l_{E2}	[m]	1.361	6.968	12.859
	l_{E3}	[m]	1.379	6.967	12.871
	l_{E4}	[m]	1.376	6.967	12.870
Summe der Radien der umhüllenden Abbaufläche und der halben Absenkungsreichweite ($l_{E4}/2$) (erwartete Einflussreichweite)	$l_{E,erwartet}$	[m]	3.001	5.357	8.690
Summe der Radien der umhüllenden Abbaufläche u. der Absenkungsreichweite (l_{E4}) (maximale Einflussreichweite)	$l_{E,max}$	[m]	3.689	8.841	15.125

Anhang 9: Eingangsdaten des analytischen Modells.

Modelleingangsdaten	Formelzeichen	Einheit	Herleitung, Quelle, Erläuterung in Abschnitt
Grubenwasser(druck)fläche	$h_{\text{Gbw},j}$	m NHN	Zeitliche Entwicklung; gemessen an Schächten, Grubenwassermessstellen, o.Ä.
Gesamtzuflussrate zu Beginn des Grubenwasseranstiegs	$\dot{V}_{\text{Zufluss,ges}}$	m ³ /min, m ³ /d	Messung; Summe aus Infiltrationsrate und Zuflussrate von Tiefenwasser; siehe Abschnitt 4.2.4.
Infiltrationsspende	\dot{h}_{Inf}	m ³ /(min·m ²), m ³ /(d·m ²)	Gemessen; wenn nicht möglich rechnerisch abgeschätzt; siehe Abschnitt 4.2.4.
Zuflussrate von Tiefenwasser	\dot{V}_{Tw}	m ³ /min, m ³ /d	Gemessen; wenn nicht möglich rechnerisch abgeschätzt; siehe Abschnitt 4.2.4.
bergmännisch geschaffenes Resthohlraumvolumen	V_{RHV}	m ³	Aus Risswerken zu entnehmen oder aus Rohfördermengen ableitbar; siehe Abschnitt 4.3.2 und Abschnitt 6.4.4.
speichernutzbare Porosität (Poren, Klüfte) des Gebirges	n_{Peff}	1	Annahmen (zwischen 0,1 und ~ 3 %); siehe Abschnitt 4.2.3.
Durchlässigkeitskoeffizient, je lithologische Einheit	k_f	m/s, m/d	Annahmen (vor allem anhand von Laborversuchen); siehe Abschnitt 4.2.2.
Reichweite des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs	l_E	m	Annahmen. Ermittlung anhand empirischer Gleichung zeigt zu große Schwankungsbreite; siehe Abschnitt 4.3.5.
natürliche Grund- und Grubenwasser(druck)fläche am Rand des hydraulisch wirksamen Einflussbereichs	$h_{\text{GW}}, h_{\text{Gbw}}$	m NHN	Gemessen an Grundwassermessstellen; wenn nicht möglich muss Annahme getroffen werden; Abschnitt 4.2.7 und Abschnitt 4.2.8
Teufenlage der Schichtgrenzen lithologischer Einheiten	z_{Sch}	m NHN	Dokumentiert in Schachtschnitten, Bohrprofilen.

Anhang 10: Statistischer (vollfaktorieller) Versuchsplan für die Ermittlung der Modellsensitivität.

Variante	Resthohlraum- volumen V_{RHV}	hydr. wirks. Einflussbereich l_E	Durchlässigkeits- koeffizient k_f	Infiltrations- spende \dot{h}_{Inf}
V1	– (0,9 × oW)	– (0,9 × oW)	– (0,9 × oW)	– (0,9 × oW)
V2	+ (1,1 × oW)	– (0,9 × oW)	– (0,9 × oW)	– (0,9 × oW)
V3	– (0,9 × oW)	+ (1,1 × oW)	– (0,9 × oW)	– (0,9 × oW)
V4	+ (1,1 × oW)	+ (1,1 × oW)	– (0,9 × oW)	– (0,9 × oW)
V5	– (0,9 × oW)	– (0,9 × oW)	+ (1,1 × oW)	– (0,9 × oW)
V6	+ (1,1 × oW)	– (0,9 × oW)	+ (1,1 × oW)	– (0,9 × oW)
V7	– (0,9 × oW)	+ (1,1 × oW)	+ (1,1 × oW)	– (0,9 × oW)
V8	+ (1,1 × oW)	+ (1,1 × oW)	+ (1,1 × oW)	– (0,9 × oW)
V9	– (0,9 × oW)	– (0,9 × oW)	– (0,9 × oW)	+ (1,1 × oW)
V10	+ (1,1 × oW)	– (0,9 × oW)	– (0,9 × oW)	+ (1,1 × oW)
V11	– (0,9 × oW)	+ (1,1 × oW)	– (0,9 × oW)	+ (1,1 × oW)
V12	+ (1,1 × oW)	+ (1,1 × oW)	– (0,9 × oW)	+ (1,1 × oW)
V13	– (0,9 × oW)	– (0,9 × oW)	+ (1,1 × oW)	+ (1,1 × oW)
V14	+ (1,1 × oW)	– (0,9 × oW)	+ (1,1 × oW)	+ (1,1 × oW)
V15	– (0,9 × oW)	+ (1,1 × oW)	+ (1,1 × oW)	+ (1,1 × oW)
V16	+ (1,1 × oW)	+ (1,1 × oW)	+ (1,1 × oW)	+ (1,1 × oW)
V17	o	o	o	o
V18	– (0,9 × oW)	o	o	o
V19	+ (1,1 × oW)	o	o	o
V20	o	– (0,9 × oW)	o	o
V21	o	+ (1,1 × oW)	o	o
V22	o	o	– (0,9 × oW)	o
V23	o	o	+ (1,1 × oW)	o
V24	o	o	o	– (0,9 × oW)
V25	o	o	o	+ (1,1 × oW)

Erläuterung:

– : untere Stufe. + : obere Stufe. o : modellgestützt ermittelter optimaler Wert (oW).

Anhang 11: Absolute und relative Abweichungen zwischen den Zeitreihen der berechneten und gemessenen Daten.Modellergebnisse für das **Bergwerk Ibbenbüren** (* Absolutbeträge).

Effekt Variante	Abweichung zwischen Modell- und Basisvariante			
	Grubenwasser(druck)fläche ($y_{\Delta h}$)		Zuflussrate ($y_{\Delta \text{Zufluss}}$)	
	absolut (m)	relativ (%)	absolut (m)	relativ (%)
V1_IB	25,8	4,6	-4.680,5	21,5
V2_IB	48,8	8,7	-4.680,5	21,5
V3_IB	8,9	1,6	663,6	3,1
V4_IB	10,9	1,9	663,6	3,1
V5_IB	21,8	3,8	-3.422,4	15,7
V6_IB	43,2	7,7	-3.422,4	15,7
V7_IB	11,1	2,0	1.858,2	8,6
V8_IB	8,2	1,5	1.858,2	8,6
V9_IB	7,3	1,3	-2.146,9	9,9
V10_IB	16,0	2,8	-2.146,9	9,9
V11_IB	29,8	5,3	4.448,5	20,5
V12_IB	20,1	3,6	4.448,5	20,5
V13_IB	9,3	1,7	-888,7	4,1
V14_IB	12,5	2,2	-888,7	4,1
V15_IB	31,0	5,5	5.643,1	26,0
V16_IB	21,4	3,8	5.643,1	26,0
V17_IB	5,7	1,0	15,9	0,1
V18_IB	10,7	1,9	15,9	0,1
V19_IB	9,9	1,8	15,9	0,1
V20_IB	18,2	3,2	-2.784,6	12,8
V21_IB	15,9	2,8	3.153,3	14,5
V22_IB	5,7	1,0	-596,1	2,7
V23_IB	5,6	1,0	627,9	2,9
V24_IB	16,0	2,8	-1.548,1	7,1
V25_IB	14,7	2,6	1.579,9	7,3
Minimum	5,6	1,0	15,9*	0,1
Arith. Mittelwert	17,1	3,1	2.313,6*	10,6
Maximum	48,8	8,7	5.643,1	26,0

Abschnitt 11 – Anhänge

Modellergebnisse für das **Bergwerk Königsborn** (* Absolutbeträge).

Effekt Variante	Abweichung zwischen Modell- und Basisvariante			
	Grubenwasser(druck)fläche ($y_{\Delta h}$)		Zuflussrate ($y_{\Delta \text{Zufluss}}$)	
	absolut (m)	relativ (%)	absolut (m)	relativ (%)
V1_KB	57,6	6,2	-735,5	16,0
V2_KB	123,3	13,3	-735,5	16,0
V3_KB	23,1	2,5	-152,1	3,3
V4_KB	43,8	4,7	-152,1	3,3
V5_KB	42,4	4,6	-193,3	4,2
V6_KB	88,5	9,6	-193,3	4,2
V7_KB	39,8	4,3	362,6	7,9
V8_KB	22,8	2,5	362,6	7,9
V9_KB	22,1	2,4	-417,2	9,1
V10_KB	55,7	6,0	-417,2	9,1
V11_KB	89,7	9,7	323,4	7,0
V12_KB	57,8	6,3	323,4	7,0
V13_KB	39,8	4,3	125,1	2,7
V14_KB	27,7	3,0	125,1	2,7
V15_KB	101,4	11,0	838,1	18,2
V16_KB	72,4	7,8	838,1	18,2
V17_KB	11,4	1,2	-6,0	0,1
V18_KB	11,2	3,4	-6,0	0,1
V19_KB	19,9	2,2	-6,0	0,1
V20_KB	39,9	4,3	-305,2	6,6
V21_KB	59,1	6,4	343,0	7,4
V22_KB	15,5	1,7	-269,7	5,9
V23_KB	19,0	2,1	257,7	5,6
V24_KB	37,8	4,1	-202,5	4,4
V25_KB	42,5	4,6	190,5	4,1
Minimum	11,4	1,2	6,0*	0,1
Arith. Mittelwert	47,4	5,1	315,2*	6,8
Maximum	123,3	13,3	838,1	18,2

Abweichung zwischen Modell- und Basisvariante				
Effekt	Grubenwasser(druck)fläche ($y_{\Delta h}$)		Zuflussrate ($y_{\Delta \text{Zufluss}}$)	
Variante	absolut (m)	relativ (%)	absolut (m)	relativ (%)
V1_WF	28,0	3,8	-410,1	11,4
V2_WF	122,0	16,3	-410,1	11,4
V3_WF	24,5	3,3	-236,8	6,6
V4_WF	103,0	13,8	-236,8	6,6
V5_WF	72,9	9,8	166,4	4,6
V6_WF	35,7	4,8	166,4	4,6
V7_WF	67,0	9,0	312,9	8,7
V8_WF	31,0	4,1	312,9	8,7
V9_WF	24,1	3,2	-277,9	7,7
V10_WF	92,4	12,4	-277,9	7,7
V11_WF	43,6	5,8	-39,2	1,1
V12_WF	57,5	7,7	-39,2	1,1
V13_WF	108,5	14,5	298,7	8,3
V14_WF	15,1	2,0	298,7	8,3
V15_WF	110,7	14,8	510,5	14,2
V16_WF	28,4	3,8	510,5	14,2
V17_WF	15,4	2,1	27,5	0,8
V18_WF	50,5	6,8	27,5	0,8
V19_WF	55,2	7,4	27,5	0,8
V20_WF	17,3	2,3	-55,7	1,6
V21_WF	17,0	2,3	136,9	3,8
V22_WF	53,2	7,1	-253,6	7,1
V23_WF	41,8	5,6	308,6	8,6
V24_WF	32,5	4,4	-54,2	1,5
V25_WF	24,1	3,2	109,1	3,0
Minimum	15,1	2,0	27,5*	0,8
Arith. Mittelwert	50,8	6,8	220,2*	6,1
Maximum	122,0	16,3	510,5	14,2

Anhang 12: Koeffizienten (Wirkstärken) der linearen, quadratischen und wechselwirkenden Termen der Beschreibungsmodelle für die Abweichung zwischen Zeitreihen der berechneten und gemessenen Grubenwasser(druck)fläche.

Wirkstärken der Faktoren und Terme auf den Grubenwasseranstieg im **Bergwerk Ibbenbüren**.

Faktor	Wirkstärke	Standard- abweichung	p-Wert	Konfidenz- intervall
Fehlerkonstante	1,57	0,185	6,85E-07	0,396
Lineare Terme				
V_{RHV}	0,35	0,103	3,94E-03	0,220
l_E	-0,45	0,103	6,88E-04	0,220
k_f	-0,10	0,103	3,55E-01	0,220
h_{Inf}	-0,32	0,103	8,18E-03	0,220
Quadratische Terme				
$l_E \times l_E$	1,46	0,263	6,99E-05	0,563
$k_f \times k_f$	-0,57	0,263	4,80E-02	0,563
$h_{Inf} \times h_{Inf}$	1,16	0,263	5,81E-04	0,563
Wechselwirkende Terme				
$V_{RHV} \times l_E$	-0,86	0,109	1,64E-06	0,234
$V_{RHV} \times h_{Inf}$	-0,58	0,109	1,15E-04	0,234
$l_E \times h_{Inf}$	1,75	0,109	2,07E-10	0,234

$R^2 = 0,97$; $Q^2 = 0,92$; $R^2 - Q^2 = 0,05$

Wirkstärken der Faktoren und Terme auf den Grubenwasseranstieg im **Bergwerk Königsborn**.

Faktor	Wirkstärke	Standardab- weichung	p-Wert	Konfidenzin- tervall
Fehlerkonstante	2,46	0,427	1,25E-04	0,941
Lineare Terme				
V_{RHV}	0,39	0,238	1,29E-01	0,523
l_E	0,08	0,238	7,55E-01	0,523
k_f	-0,21	0,238	3,97E-01	0,523
h_{Inf}	0,18	0,238	4,66E-01	0,523
Quadratische Terme				
$l_E \times l_E$	2,73	0,608	9,01E-04	1,337
$k_f \times k_f$	-0,76	0,608	2,39E-01	1,337
$h_{Inf} \times h_{Inf}$	1,71	0,608	1,66E-02	1,337
Wechselwirkende Terme				
$V_{RHV} \times l_E$	-1,29	0,252	3,42E-04	0,555
$V_{RHV} \times k_f$	-0,68	0,252	2,13E-02	0,555
$V_{RHV} \times h_{Inf}$	-1,05	0,252	1,60E-03	0,555
$l_E \times k_f$	0,56	0,252	4,99E-02	0,555
$l_E \times h_{Inf}$	2,42	0,252	1,10E-06	0,555
$k_f \times h_{Inf}$	0,48	0,252	8,54E-02	0,555

$R^2 = 0,95$; $Q^2 = 0,75$; $R^2 - Q^2 = 0,20$

Abschnitt 11 – Anhänge

Wirkstärken der Faktoren und Terme auf den Grubenwasseranstieg im **Bergwerk Westfalen**.

Faktor	Wirkstärke	Standard- abweichung	p-Wert	Konfidenz- intervall
Fehlerkonstante	3,50	0,538	1,39E-05	1,153
Lineare Terme				
V_{RHV}	0,08	0,299	8,03E-01	0,641
l_E	-0,25	0,299	4,22E-01	0,641
k_f	-0,28	0,299	3,68E-01	0,641
h_{Inf}	-0,09	0,299	7,66E-01	0,641
Quadratische Terme				
$V_{RHV} \times V_{RHV}$	3,36	0,764	6,07E-04	1,639
$l_E \times l_E$	-1,42	0,764	8,44E-02	1,639
$k_f \times k_f$	2,66	0,764	3,71E-03	1,639
Wechselwirkende Terme				
$V_{RHV} \times k_f$	-4,21	0,317	2,47E-09	0,680
$V_{RHV} \times h_{Inf}$	-1,61	0,317	1,66E-04	0,680
$k_f \times h_{Inf}$	0,97	0,317	8,37E-03	0,680

$R^2 = 0,95$; $Q^2 = 0,84$; $R^2 - Q^2 = 0,11$

Anhang 13: Lösungsweg für den Mittelwertsatz der Integralrechnung.

Rechnerische Herleitung des Mittwertsatzes der Integralrechnung für den Faktor „Resthohlraumvolumen“ am Beispiel des **Bergwerks Ibzenbüren**.

$$\begin{aligned}
 \bar{y}_{\Delta h, \check{V}_{\text{RHV}}}(\check{V}_{\text{RHV}}; \check{l}_{\text{E}}; \check{k}_{\text{f}}; \check{h}_{\text{Inf}}) &= \frac{1}{0,2^4} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{V}_{\text{RHV}}} d\check{V}_{\text{RHV}} d\check{l}_{\text{E}} d\check{k}_{\text{f}} d\check{h}_{\text{Inf}} \\
 &= \frac{1}{0,2^4} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} 0,35 d\check{V}_{\text{RHV}} d\check{l}_{\text{E}} d\check{k}_{\text{f}} d\check{h}_{\text{Inf}} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} 0,35 \times \frac{\check{V}_{\text{RHV}}}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{l}_{\text{E}} d\check{k}_{\text{f}} d\check{h}_{\text{Inf}} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} 0,35 \times \frac{0,1 - (-1)}{0,2} d\check{l}_{\text{E}} d\check{k}_{\text{f}} d\check{h}_{\text{Inf}} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} 0,35 d\check{l}_{\text{E}} d\check{k}_{\text{f}} d\check{h}_{\text{Inf}} = \frac{0,35}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{l}_{\text{E}} d\check{k}_{\text{f}} d\check{h}_{\text{Inf}} \\
 &= \frac{0,35}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\check{l}_{\text{E}}}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{k}_{\text{f}} d\check{h}_{\text{Inf}} = \frac{0,35}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} d\check{k}_{\text{f}} d\check{h}_{\text{Inf}} \\
 &= \frac{0,35}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{k}_{\text{f}} d\check{h}_{\text{Inf}} = \frac{0,35}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\check{k}_{\text{f}}}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{h}_{\text{Inf}} \\
 &= \frac{0,35}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} d\check{h}_{\text{Inf}} = \frac{0,35}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{h}_{\text{Inf}} = 0,35 \times \frac{\check{h}_{\text{Inf}}}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} \\
 &= 0,35 \times \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} = 0,35
 \end{aligned}$$

Rechnerische Herleitung des Mittwertsatzes der Integralrechnung für den Faktor „**Reichweite des Einflussbereichs**“ am Beispiel des **Bergwerks Ibbenbüren**.

$$\begin{aligned}
 \bar{y}_{\Delta h, \check{l}_E}(\check{l}_E; \check{V}_{RHV}; \check{k}_f; \check{h}_{Inf}) &= \frac{1}{0,2^4} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{l}_E} d\check{l}_E d\check{V}_{RHV} d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} \\
 &= \frac{1}{0,2^4} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} -0,45 + (2 \times 1,46 \times \check{l}_E) d\check{l}_E d\check{V}_{RHV} d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} -0,45 \times \check{l}_E \Big|_{-0,1}^{0,1} + \left(\frac{2,92}{2} \times \frac{\check{l}_E^2}{0,2} \right) \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{V}_{RHV} d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} -0,45 \times \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} + (1,46 \\
 &\quad \times \frac{0,1^2 - (-0,1)^2}{0,2}) d\check{V}_{RHV} d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} -0,45 d\check{V}_{RHV} d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} \\
 &= -\frac{0,45}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{V}_{RHV} d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} \\
 &= -\frac{0,45}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \check{V}_{RHV} \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} \\
 &= -\frac{0,45}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} \\
 &= -\frac{0,45}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} = -\frac{0,45}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} \check{k}_f \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{h}_{Inf} \\
 &= -\frac{0,45}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} d\check{h}_{Inf} = -\frac{0,45}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{h}_{Inf} = -0,45 \times \frac{\check{h}_{Inf}}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} \\
 &= -0,45 \times \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} = -0,45
 \end{aligned}$$

Rechnerische Herleitung des Mittwertsatzes der Integralrechnung für den Faktor „Durchlässigkeitskoeffizient“ am Beispiel des **Bergwerks Ibbenbüren**.

$$\begin{aligned}
 \bar{y}_{\Delta h, \check{k}_f}(\check{k}_f; \check{l}_E; \check{V}_{RHV}; \check{h}_{Inf}) &= \frac{1}{0,2^4} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{k}_f} d\check{k}_f d\check{l}_E d\check{V}_{RHV} d\check{h}_{Inf} \\
 &= \frac{1}{0,2^4} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} -0,10 + (2 \times (-0,57) \times \check{k}_f) d\check{k}_f d\check{l}_E d\check{V}_{RHV} d\check{h}_{Inf} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} -0,10 \times \frac{\check{k}_f}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} + \left(-\frac{1,14}{2}\right. \\
 &\quad \times \left.\frac{\check{k}_f^2}{0,2}\right) \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{l}_E d\check{V}_{RHV} d\check{h}_{Inf} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} -0,10 \times \frac{0,1 - (-1)}{0,2} + (-0,57 \\
 &\quad \times \frac{0,1^2 - (-0,1)^2}{0,2}) d\check{l}_E d\check{V}_{RHV} d\check{h}_{Inf} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} -0,10 d\check{l}_E d\check{V}_{RHV} d\check{h}_{Inf} \\
 &= -\frac{0,10}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{l}_E d\check{V}_{RHV} d\check{h}_{Inf} \\
 &= -\frac{0,10}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\check{l}_E}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{V}_{RHV} d\check{h}_{Inf} \\
 &= -\frac{0,10}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} d\check{V}_{RHV} d\check{h}_{Inf} \\
 &= -\frac{0,10}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{V}_{RHV} d\check{h}_{Inf} = -\frac{0,10}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\check{V}_{RHV}}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{h}_{Inf} \\
 &= -\frac{0,10}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} d\check{h}_{Inf} = -\frac{0,10}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{h}_{Inf} = -0,10 \times \frac{\check{h}_{Inf}}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} \\
 &= -0,10 \times \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} = -0,10
 \end{aligned}$$

Rechnerische Herleitung des Mittwertsatzes der Integralrechnung für den Faktor „Infiltrations-spende“ am Beispiel des **Bergwerks Ibbenbüren**.

$$\begin{aligned}
 \bar{y}_{\Delta h, \check{h}_{\text{Inf}}}(\check{h}_{\text{Inf}}; \check{k}_f; \check{l}_E; \check{V}_{\text{RHV}}) &= \frac{1}{0,2^4} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{h}_{\text{Inf}}} d\check{h}_{\text{Inf}} d\check{k}_f d\check{l}_E d\check{V}_{\text{RHV}} \\
 &= \frac{1}{0,2^4} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} -0,32 + (2 \times 1,16 \times \check{h}_{\text{Inf}}) d\check{h}_{\text{Inf}} d\check{k}_f d\check{l}_E d\check{V}_{\text{RHV}} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} -0,32 \times \check{h}_{\text{Inf}} \Big|_{-0,1}^{0,1} + \left(\frac{2,32}{2} \times \frac{\check{h}_{\text{Inf}}^2}{0,2} \right) \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{k}_f d\check{l}_E d\check{V}_{\text{RHV}} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} -0,32 \times \frac{0,1 - (-1)}{0,2} + (1,16 \\
 &\quad \times \frac{0,1^2 - (-0,1)^2}{0,2}) d\check{k}_f d\check{l}_E d\check{V}_{\text{RHV}} = \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} -0,32 d\check{k}_f d\check{l}_E d\check{V}_{\text{RHV}} \\
 &= -\frac{0,32}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{k}_f d\check{l}_E d\check{V}_{\text{RHV}} = -\frac{0,32}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \check{k}_f \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{l}_E d\check{V}_{\text{RHV}} \\
 &= -\frac{0,32}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} d\check{l}_E d\check{V}_{\text{RHV}} \\
 &= -\frac{0,32}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{l}_E d\check{V}_{\text{RHV}} = -\frac{0,32}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} \check{l}_E \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{V}_{\text{RHV}} \\
 &= -\frac{0,32}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} d\check{V}_{\text{RHV}} = -\frac{0,32}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{V}_{\text{RHV}} \\
 &= -0,32 \times \frac{\check{V}_{\text{RHV}}}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} = -0,32 \times \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} = -0,32
 \end{aligned}$$

Rechnerische Herleitung des Mittwertsatzes der Integralrechnung für den Faktor „Resthohlraumvolumen“ am Beispiel des **Bergwerks Königsborn**.

$$\begin{aligned}
 \bar{y}_{\Delta h, \check{V}_{\text{RHV}}}(\check{V}_{\text{RHV}}; \check{l}_E; \check{k}_f; \check{h}_{\text{Inf}}) &= \frac{1}{0,2^4} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{V}_{\text{RHV}}} d\check{V}_{\text{RHV}} d\check{l}_E d\check{k}_f d\check{h}_{\text{Inf}} \\
 &= \frac{1}{0,2^4} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} 0,39 d\check{V}_{\text{RHV}} d\check{l}_E d\check{k}_f d\check{h}_{\text{Inf}} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} 0,39 \times \frac{\check{V}_{\text{RHV}}}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{l}_E d\check{k}_f d\check{h}_{\text{Inf}} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} 0,39 \times \frac{0,1 - (-1)}{0,2} d\check{l}_E d\check{k}_f d\check{h}_{\text{Inf}} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} 0,39 d\check{l}_E d\check{k}_f d\check{h}_{\text{Inf}} = \frac{0,39}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{l}_E d\check{k}_f d\check{h}_{\text{Inf}} \\
 &= \frac{0,39}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\check{l}_E}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{k}_f d\check{h}_{\text{Inf}} = \frac{0,39}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} d\check{k}_f d\check{h}_{\text{Inf}} \\
 &= \frac{0,39}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{k}_f d\check{h}_{\text{Inf}} = \frac{0,39}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\check{k}_f}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{h}_{\text{Inf}} \\
 &= \frac{0,39}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} d\check{h}_{\text{Inf}} = \frac{0,39}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{h}_{\text{Inf}} = 0,39 \times \frac{\check{h}_{\text{Inf}}}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} \\
 &= 0,39 \times \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} = 0,39
 \end{aligned}$$

Rechnerische Herleitung des Mittwertsatzes der Integralrechnung für den Faktor „Reichweite des Einflussbereichs“ am Beispiel des **Bergwerks Königsborn**.

$$\begin{aligned}
 \bar{y}_{\Delta h, \check{l}_E}(\check{l}_E; \check{V}_{RHV}; \check{k}_f; \check{h}_{Inf}) &= \frac{1}{0,2^4} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{l}_E} d\check{l}_E d\check{V}_{RHV} d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} \\
 &= \frac{1}{0,2^4} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} 0,08 + (2 \times 2,73 \times \check{l}_E) d\check{l}_E d\check{V}_{RHV} d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} 0,08 \times \frac{\check{l}_E}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} + \left(\frac{5,46}{2} \times \frac{\check{l}_E^2}{0,2} \right) \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{V}_{RHV} d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} 0,08 \times \frac{0,1 - (-1)}{0,2} + (2,73 \\
 &\quad \times \frac{0,1^2 - (-0,1)^2}{0,2}) d\check{V}_{RHV} d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} 0,08 d\check{V}_{RHV} d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} \\
 &= \frac{0,08}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{V}_{RHV} d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} = \frac{0,08}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\check{V}_{RHV}}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} \\
 &= \frac{0,08}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} \\
 &= \frac{0,08}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} = \frac{0,08}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\check{k}_f}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{h}_{Inf} \\
 &= \frac{0,08}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} d\check{h}_{Inf} = \frac{0,08}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{h}_{Inf} = 0,08 \times \frac{\check{h}_{Inf}}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} \\
 &= 0,08 \times \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} = 0,08
 \end{aligned}$$

Rechnerische Herleitung des Mittwertsatzes der Integralrechnung für den Faktor „Durchlässigkeitskoeffizient“ am Beispiel des **Bergwerks Königsborn**.

$$\begin{aligned}
 \bar{y}_{\Delta h, \check{k}_f}(\check{k}_f; \check{l}_E; \check{V}_{RHV}; \check{h}_{Inf}) &= \frac{1}{0,2^4} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{k}_f} d\check{k}_f d\check{l}_E d\check{V}_{RHV} d\check{h}_{Inf} \\
 &= \frac{1}{0,2^4} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} -0,21 + (2 \times (-0,76) \times \check{k}_f) d\check{k}_f d\check{l}_E d\check{V}_{RHV} d\check{h}_{Inf} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} -0,21 \times \frac{\check{k}_f}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} + \left(-\frac{1,52}{2}\right. \\
 &\quad \times \left.\frac{\check{k}_f^2}{0,2}\right) \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{l}_E d\check{V}_{RHV} d\check{h}_{Inf} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} -0,21 \times \frac{0,1 - (-1)}{0,2} + (-0,76 \\
 &\quad \times \frac{0,1^2 - (-0,1)^2}{0,2}) d\check{l}_E d\check{V}_{RHV} d\check{h}_{Inf} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} -0,21 d\check{l}_E d\check{V}_{RHV} d\check{h}_{Inf} \\
 &= -\frac{0,21}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{l}_E d\check{V}_{RHV} d\check{h}_{Inf} \\
 &= -\frac{0,21}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\check{l}_E}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{V}_{RHV} d\check{h}_{Inf} \\
 &= -\frac{0,21}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} d\check{V}_{RHV} d\check{h}_{Inf} \\
 &= -\frac{0,21}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{V}_{RHV} d\check{h}_{Inf} = -\frac{0,21}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\check{V}_{RHV}}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{h}_{Inf} \\
 &= -\frac{0,21}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} d\check{h}_{Inf} = -\frac{0,21}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{h}_{Inf} = -0,21 \times \frac{\check{h}_{Inf}}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} \\
 &= -0,21 \times \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} = -0,21
 \end{aligned}$$

Rechnerische Herleitung des Mittwertsatzes der Integralrechnung für den Faktor „Infiltrations-spende“ am Beispiel des **Bergwerks Königsborn**.

$$\begin{aligned}
 \bar{y}_{\Delta h, \check{h}_{\text{Inf}}}(\check{h}_{\text{Inf}}; \check{k}_f; \check{l}_E; \check{V}_{\text{RHV}}) &= \frac{1}{0,2^4} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{h}_{\text{Inf}}} d\check{h}_{\text{Inf}} d\check{k}_f d\check{l}_E d\check{V}_{\text{RHV}} \\
 &= \frac{1}{0,2^4} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} 0,18 + (2 \times 1,71 \times \check{h}_{\text{Inf}}) d\check{h}_{\text{Inf}} d\check{k}_f d\check{l}_E d\check{V}_{\text{RHV}} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} 0,18 \times \frac{\check{h}_{\text{Inf}}}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} + \left(\frac{3,42}{2} \times \frac{\check{h}_{\text{Inf}}^2}{0,2} \right) \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{k}_f d\check{l}_E d\check{V}_{\text{RHV}} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} 0,18 \times \frac{0,1 - (-1)}{0,2} + (3,42 \\
 &\quad \times \frac{0,1^2 - (-0,1)^2}{0,2}) d\check{k}_f d\check{l}_E d\check{V}_{\text{RHV}} = \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} 0,18 d\check{k}_f d\check{l}_E d\check{V}_{\text{RHV}} \\
 &= \frac{0,18}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{k}_f d\check{l}_E d\check{V}_{\text{RHV}} = \frac{0,18}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\check{k}_f}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{l}_E d\check{V}_{\text{RHV}} \\
 &= \frac{0,18}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} d\check{l}_E d\check{V}_{\text{RHV}} \\
 &= \frac{0,18}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{l}_E d\check{V}_{\text{RHV}} = \frac{0,18}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\check{l}_E}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{V}_{\text{RHV}} \\
 &= \frac{0,18}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} d\check{V}_{\text{RHV}} = \frac{0,18}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{V}_{\text{RHV}} = 0,18 \times \frac{\check{V}_{\text{RHV}}}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} \\
 &= 0,32 \times \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} = 0,18
 \end{aligned}$$

Rechnerische Herleitung des Mittwertsatzes der Integralrechnung für den Faktor „Resthohlraumvolumen“ am Beispiel des **Bergwerks Westfalen**.

$$\begin{aligned}
 \bar{y}_{\Delta h, \check{V}_{\text{RHV}}}(\check{V}_{\text{RHV}}; \check{l}_{\text{E}}; \check{k}_{\text{f}}; \check{h}_{\text{Inf}}) &= \frac{1}{0,2^4} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{V}_{\text{RHV}}} d\check{V}_{\text{RHV}} d\check{l}_{\text{E}} d\check{k}_{\text{f}} d\check{h}_{\text{Inf}} \\
 &= \frac{1}{0,2^4} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} 0,08 + (2 \times 3,29 \times \check{V}_{\text{RHV}}) d\check{V}_{\text{RHV}} d\check{l}_{\text{E}} d\check{k}_{\text{f}} d\check{h}_{\text{Inf}} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} 0,08 \times \frac{\check{V}_{\text{RHV}}}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} + \left(\frac{6,58}{2} \times \frac{\check{V}_{\text{RHV}}^2}{0,2} \right) \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{l}_{\text{E}} d\check{k}_{\text{f}} d\check{h}_{\text{Inf}} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} 0,08 \times \frac{0,1 - (-1)}{0,2} + (3,29 \\
 &\quad \times \frac{0,1^2 - (-0,1)^2}{0,2}) d\check{l}_{\text{E}} d\check{k}_{\text{f}} d\check{h}_{\text{Inf}} = \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} 0,08 d\check{l}_{\text{E}} d\check{k}_{\text{f}} d\check{h}_{\text{Inf}} \\
 &= \frac{0,08}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{l}_{\text{E}} d\check{k}_{\text{f}} d\check{h}_{\text{Inf}} = \frac{0,08}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\check{l}_{\text{E}}}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{k}_{\text{f}} d\check{h}_{\text{Inf}} \\
 &= \frac{0,08}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} d\check{k}_{\text{f}} d\check{h}_{\text{Inf}} \\
 &= \frac{0,08}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{k}_{\text{f}} d\check{h}_{\text{Inf}} = \frac{0,08}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\check{k}_{\text{f}}}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{h}_{\text{Inf}} \\
 &= \frac{0,08}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} d\check{h}_{\text{Inf}} = \frac{0,08}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{h}_{\text{Inf}} = 0,08 \times \frac{\check{h}_{\text{Inf}}}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} \\
 &= \frac{0,08}{0,2} \times \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} = 0,08
 \end{aligned}$$

Rechnerische Herleitung des Mittwertsatzes der Integralrechnung für den Faktor „Reichweite des Einflussbereichs“ am Beispiel des **Bergwerks Westfalen**.

$$\begin{aligned}
 \bar{y}_{\Delta h, \check{l}_E}(\check{l}_E; \check{V}_{RHV}; \check{k}_f; \check{h}_{Inf}) &= \frac{1}{0,2^4} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{l}_E} d\check{l}_E d\check{V}_{RHV} d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} \\
 &= \frac{1}{0,2^4} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} -0,25 + (2 \times (-1,42) \times \check{l}_E) d\check{l}_E d\check{V}_{RHV} d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} -0,25 \times \frac{\check{l}_E}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} + \left(-\frac{2,84}{2}\right. \\
 &\quad \times \left.\frac{\check{l}_E^2}{0,2}\right) \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{V}_{RHV} d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} -0,25 \times \frac{0,1 - (-1)}{0,2} + (-1,42 \\
 &\quad \times \frac{0,1^2 - (-0,1)^2}{0,2}) d\check{V}_{RHV} d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} -0,25 d\check{V}_{RHV} d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} \\
 &= -\frac{0,25}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{V}_{RHV} d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} \\
 &= -\frac{0,25}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\check{V}_{RHV}}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} \\
 &= -\frac{0,25}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} \\
 &= -\frac{0,25}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{k}_f d\check{h}_{Inf} = -\frac{0,25}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\check{k}_f}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{h}_{Inf} \\
 &= -\frac{0,25}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} d\check{h}_{Inf} = -\frac{0,25}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{h}_{Inf} = -0,25 \times \frac{\check{h}_{Inf}}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} \\
 &= -0,25 \times \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} = -0,25
 \end{aligned}$$

Rechnerische Herleitung des Mittwertsatzes der Integralrechnung für den Faktor „Durchlässigkeitskoeffizient“ am Beispiel des **Bergwerks Westfalen**.

$$\begin{aligned}
 \bar{y}_{\Delta h, \check{k}_f}(\check{k}_f; \check{l}_E; \check{V}_{\text{RHV}}; \check{h}_{\text{Inf}}) &= \frac{1}{0,2^4} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \check{k}_f} d\check{k}_f d\check{l}_E d\check{V}_{\text{RHV}} d\check{h}_{\text{Inf}} \\
 &= \frac{1}{0,2^4} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} -0,28 + (2 \times 2,66 \times \check{k}_f) d\check{k}_f d\check{l}_E d\check{V}_{\text{RHV}} d\check{h}_{\text{Inf}} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} -0,28 \times \frac{\check{k}_f}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} + \left(\frac{5,32}{2} \times \frac{\check{k}_f^2}{0,2} \right) \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{l}_E d\check{V}_{\text{RHV}} d\check{h}_{\text{Inf}} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} -0,28 \times \frac{0,1 - (-1)}{0,2} + (2,66 \\
 &\quad \times \frac{0,1^2 - (-0,1)^2}{0,2}) d\check{l}_E d\check{V}_{\text{RHV}} d\check{h}_{\text{Inf}} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} -0,28 d\check{l}_E d\check{V}_{\text{RHV}} d\check{h}_{\text{Inf}} \\
 &= -\frac{0,28}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{l}_E d\check{V}_{\text{RHV}} d\check{h}_{\text{Inf}} \\
 &= -\frac{0,28}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\check{l}_E}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{V}_{\text{RHV}} d\check{h}_{\text{Inf}} \\
 &= -\frac{0,28}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} d\check{V}_{\text{RHV}} d\check{h}_{\text{Inf}} \\
 &= -\frac{0,28}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{V}_{\text{RHV}} d\check{h}_{\text{Inf}} = -\frac{0,28}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\check{V}_{\text{RHV}}}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} d\check{h}_{\text{Inf}} \\
 &= -\frac{0,28}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} d\check{h}_{\text{Inf}} = -\frac{0,28}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} d\check{h}_{\text{Inf}} = -0,28 \times \frac{\check{h}_{\text{Inf}}}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} \\
 &= -0,28 \times \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} = -0,28
 \end{aligned}$$

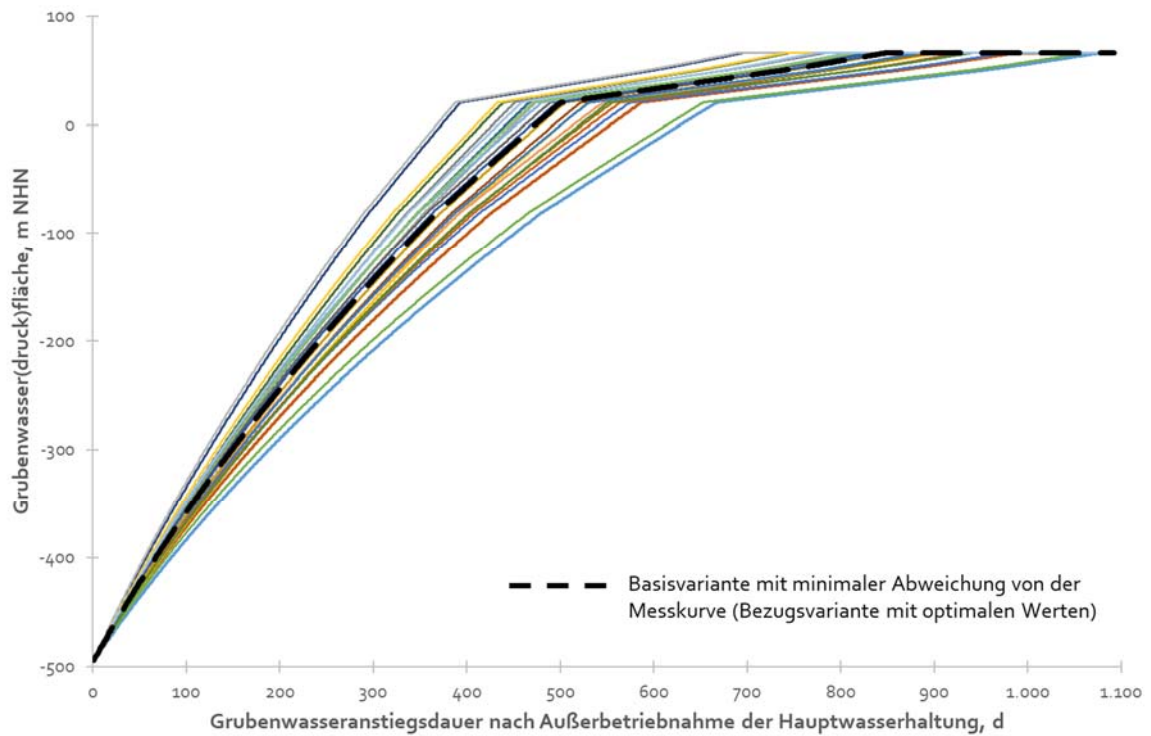
Rechnerische Herleitung des Mittwertsatzes der Integralrechnung für den Faktor „Infiltrations-
spende“ am Beispiel des **Bergwerks Westfalen**.

$$\begin{aligned}
 \bar{y}_{\Delta h, \tilde{h}_{\text{Inf}}}(\tilde{h}_{\text{Inf}}; \tilde{k}_f; \tilde{l}_E; \tilde{V}_{\text{RHV}}) &= \frac{1}{0,2^4} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\partial y_{\Delta h}}{\partial \tilde{h}_{\text{Inf}}} d\tilde{h}_{\text{Inf}} d\tilde{k}_f d\tilde{l}_E d\tilde{V}_{\text{RHV}} \\
 &= \frac{1}{0,2^4} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} -0,09 d\tilde{h}_{\text{Inf}} d\tilde{k}_f d\tilde{l}_E d\tilde{V}_{\text{RHV}} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} -0,09 \times \frac{\tilde{h}_{\text{Inf}}}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} d\tilde{k}_f d\tilde{l}_E d\tilde{V}_{\text{RHV}} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} -0,09 \times \frac{0,1 - (-1)}{0,2} d\tilde{k}_f d\tilde{l}_E d\tilde{V}_{\text{RHV}} \\
 &= \frac{1}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} -0,09 d\tilde{k}_f d\tilde{l}_E d\tilde{V}_{\text{RHV}} \\
 &= -\frac{0,09}{0,2^3} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} d\tilde{k}_f d\tilde{l}_E d\tilde{V}_{\text{RHV}} = -\frac{0,09}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\tilde{k}_f}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} d\tilde{l}_E d\tilde{V}_{\text{RHV}} \\
 &= -\frac{0,09}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} d\tilde{l}_E d\tilde{V}_{\text{RHV}} \\
 &= -\frac{0,09}{0,2^2} \int_{-0,1}^{0,1} \int_{-0,1}^{0,1} d\tilde{l}_E d\tilde{V}_{\text{RHV}} = -\frac{0,09}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{\tilde{l}_E}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} d\tilde{V}_{\text{RHV}} \\
 &= -\frac{0,09}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} d\tilde{V}_{\text{RHV}} = -\frac{0,09}{0,2} \int_{-0,1}^{0,1} d\tilde{V}_{\text{RHV}} \\
 &= -0,09 \times \frac{\tilde{V}_{\text{RHV}}}{0,2} \Big|_{-0,1}^{0,1} = -0,09 \times \frac{0,1 - (-0,1)}{0,2} = -0,09
 \end{aligned}$$

Anhang 14: Modellergebnisse der Grubenwasser(druck)flächen.

Modellierte Grubenwasseranstiegskurven am Beispiel des **Bergwerks Ibbenbüren**.

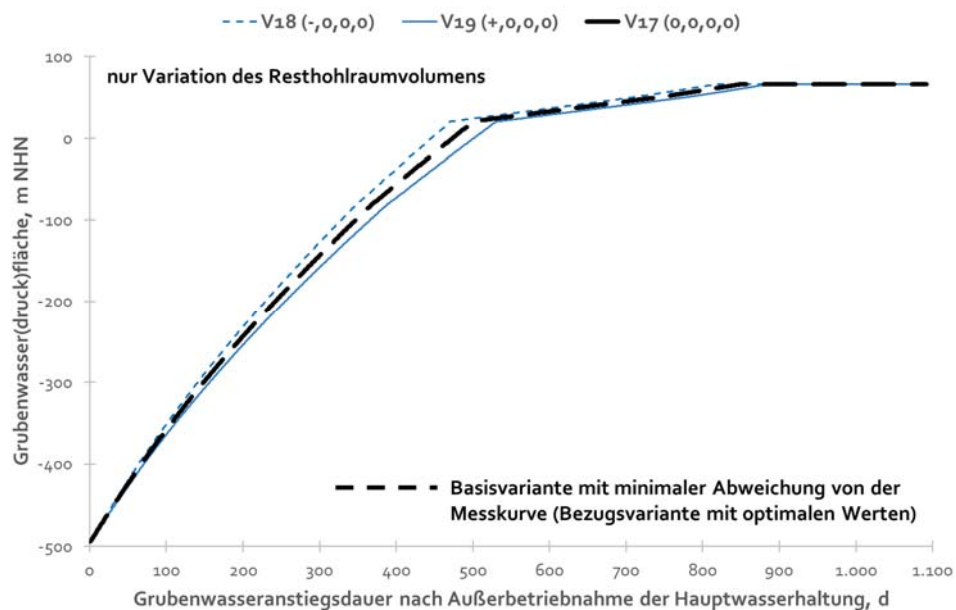
Gesamtübersicht aller Varianten

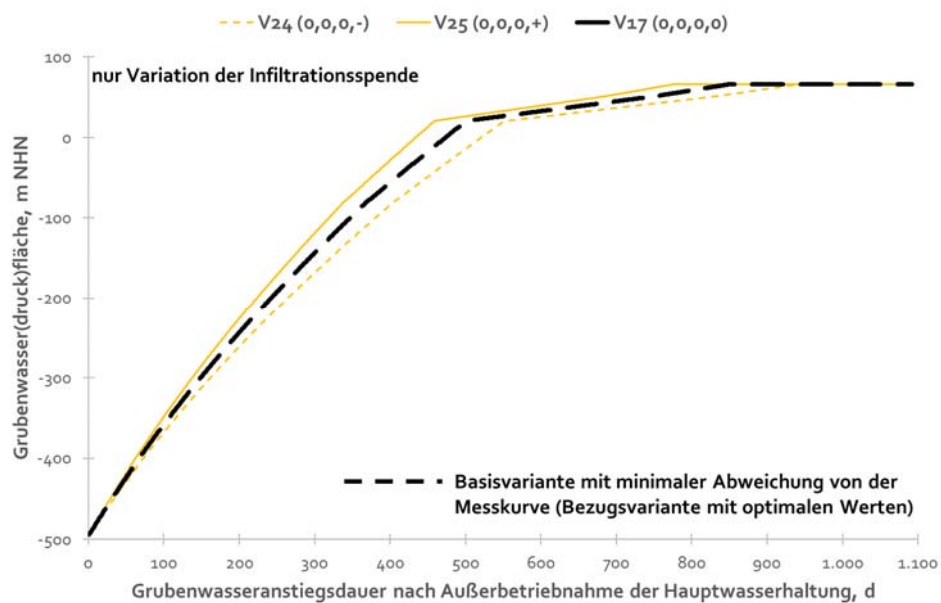
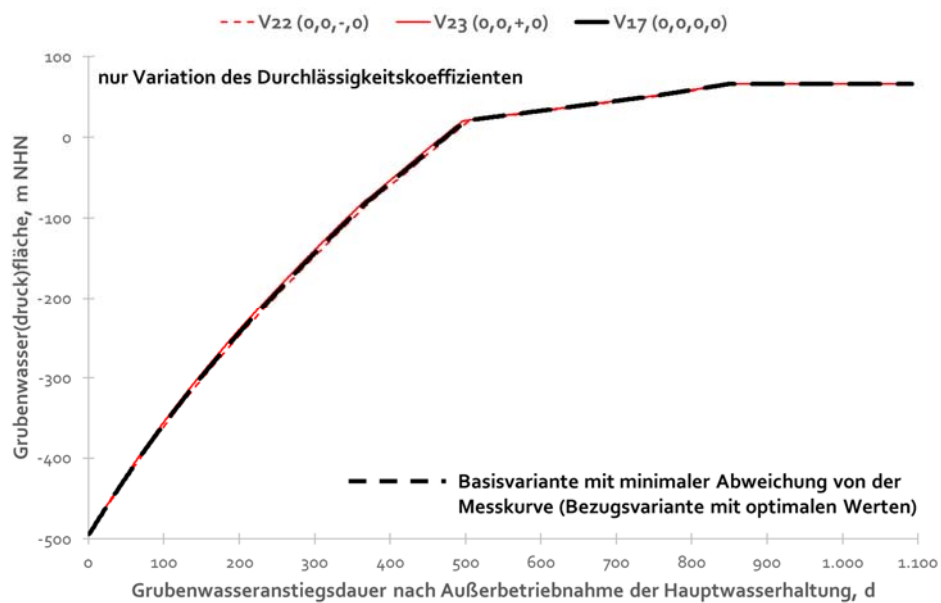
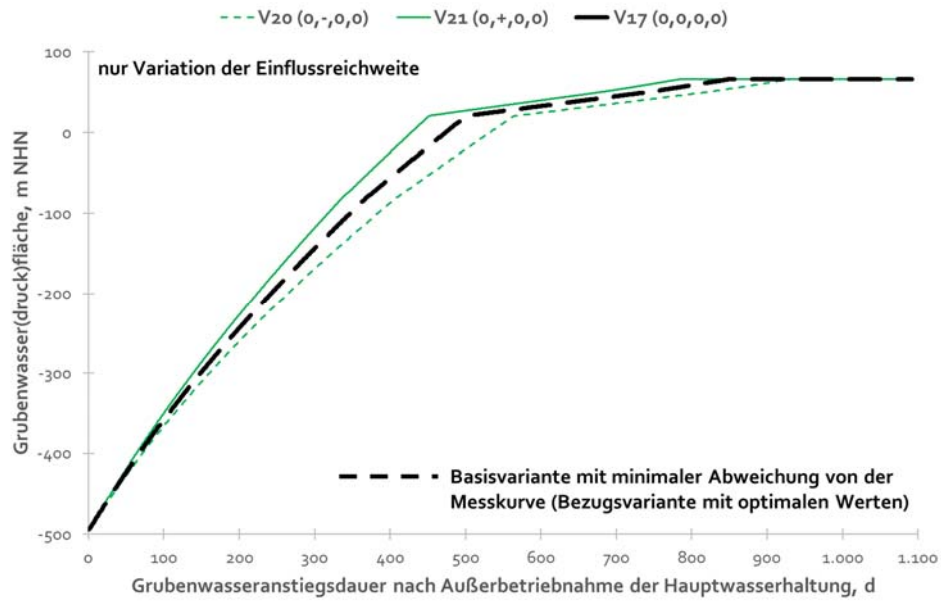


Variationen singulärer Faktoren

Erläuterungen:

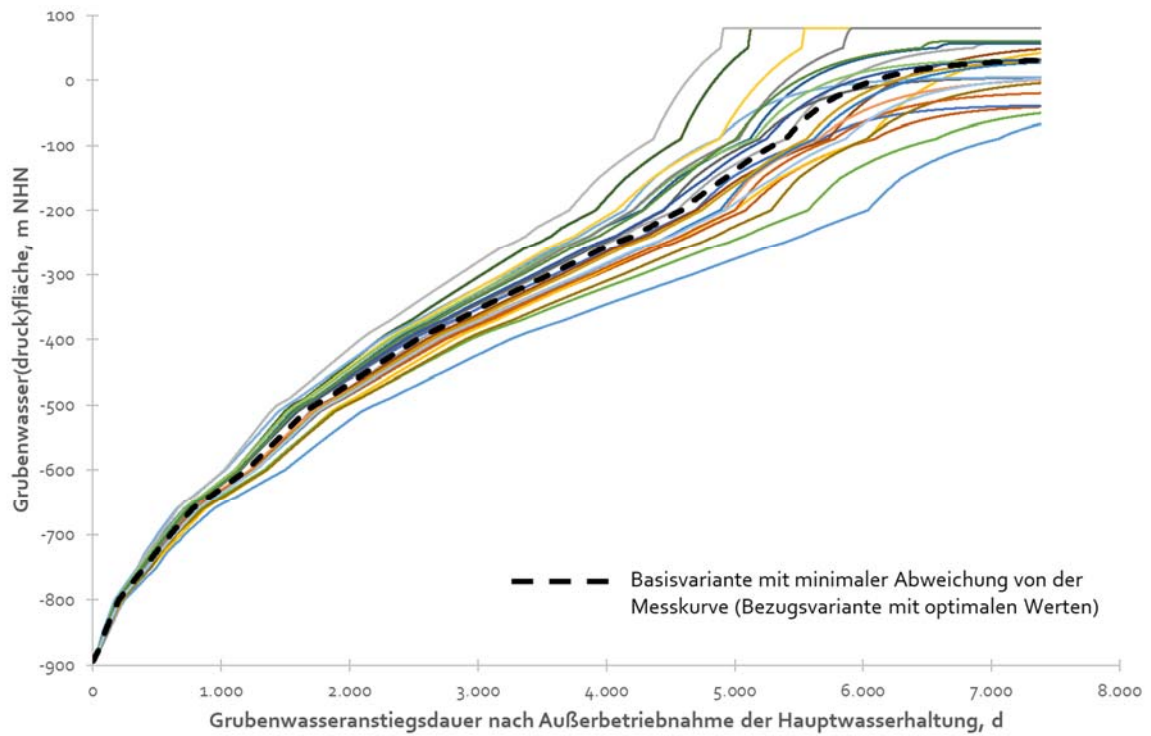
$(\check{V}_{RHV}; \check{l}_E; \check{k}_F; \check{h}_{Inf})$ - : untere Stufe; + : obere Stufe; o : optimaler Wert





Modellierte Grubenwasseranstiegskurven am Beispiel des **Bergwerks Königsborn**.

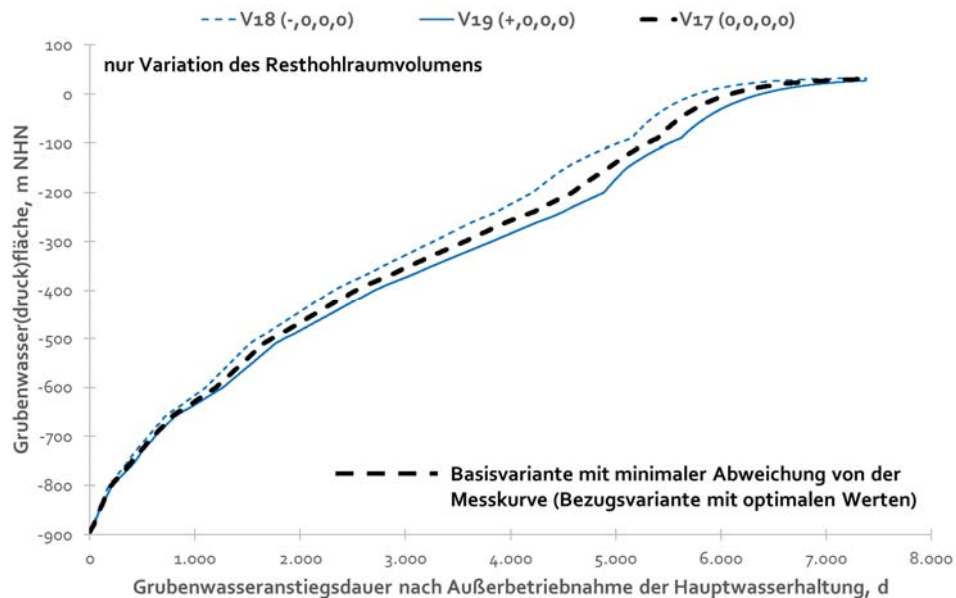
Gesamtübersicht aller Varianten

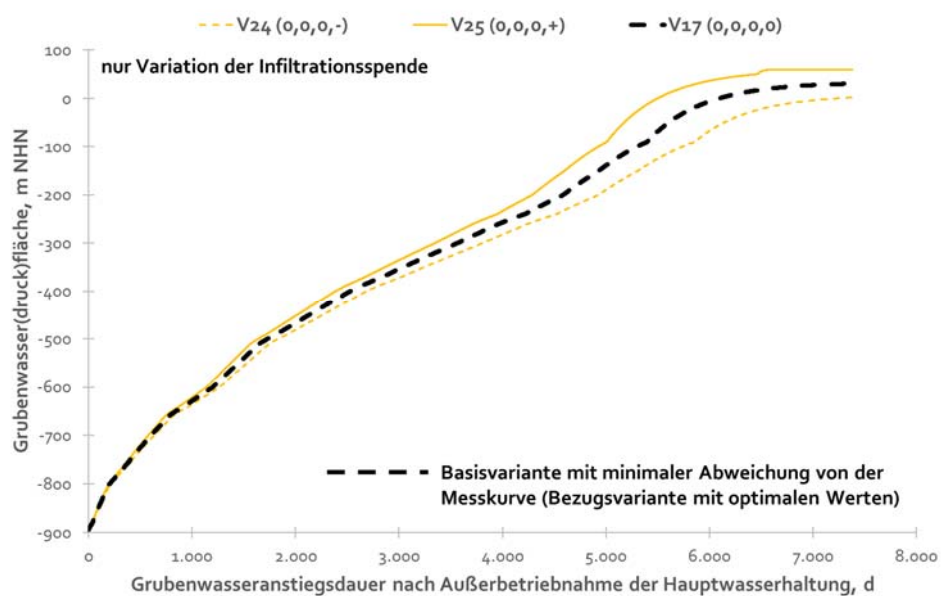
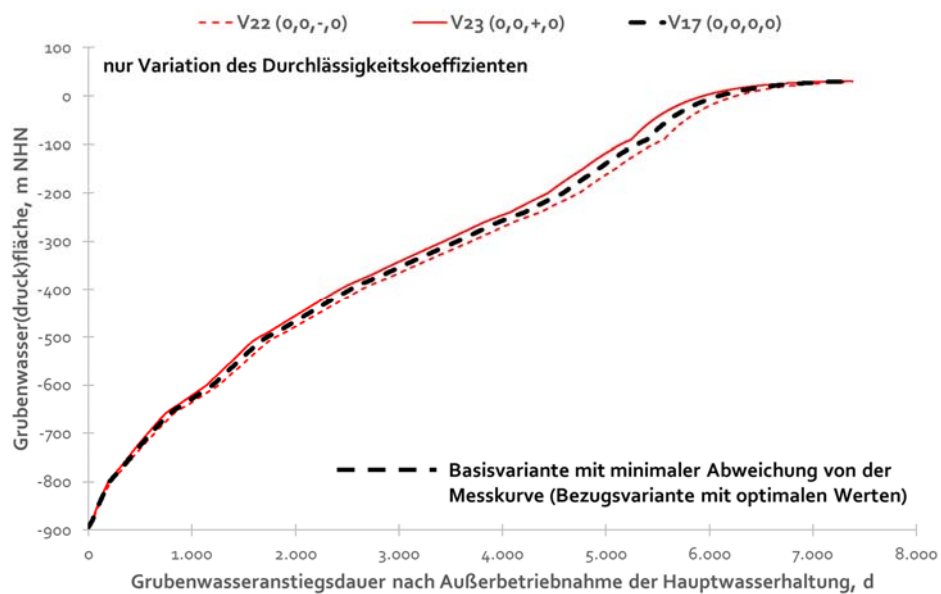
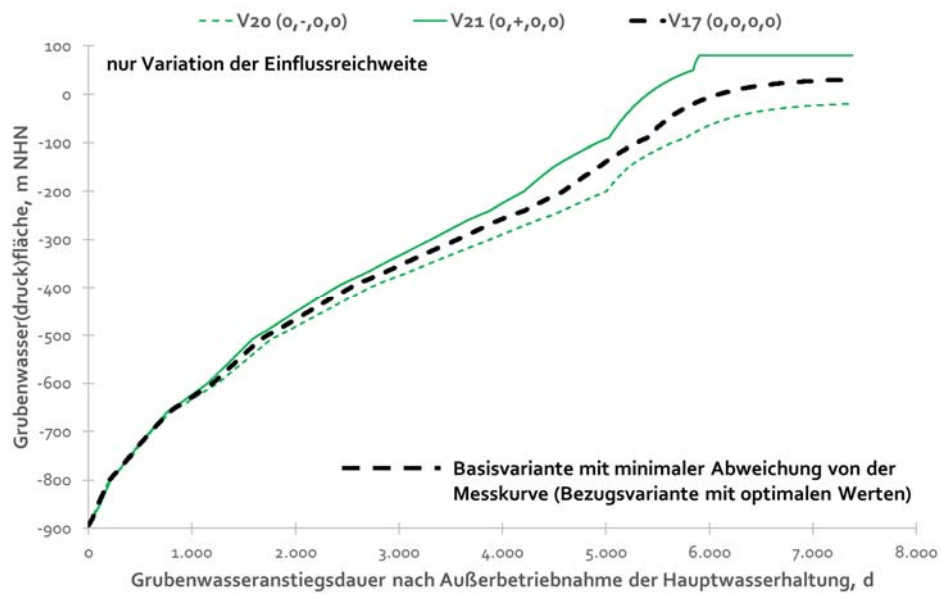


Variationen singulärer Faktoren

Erläuterungen:

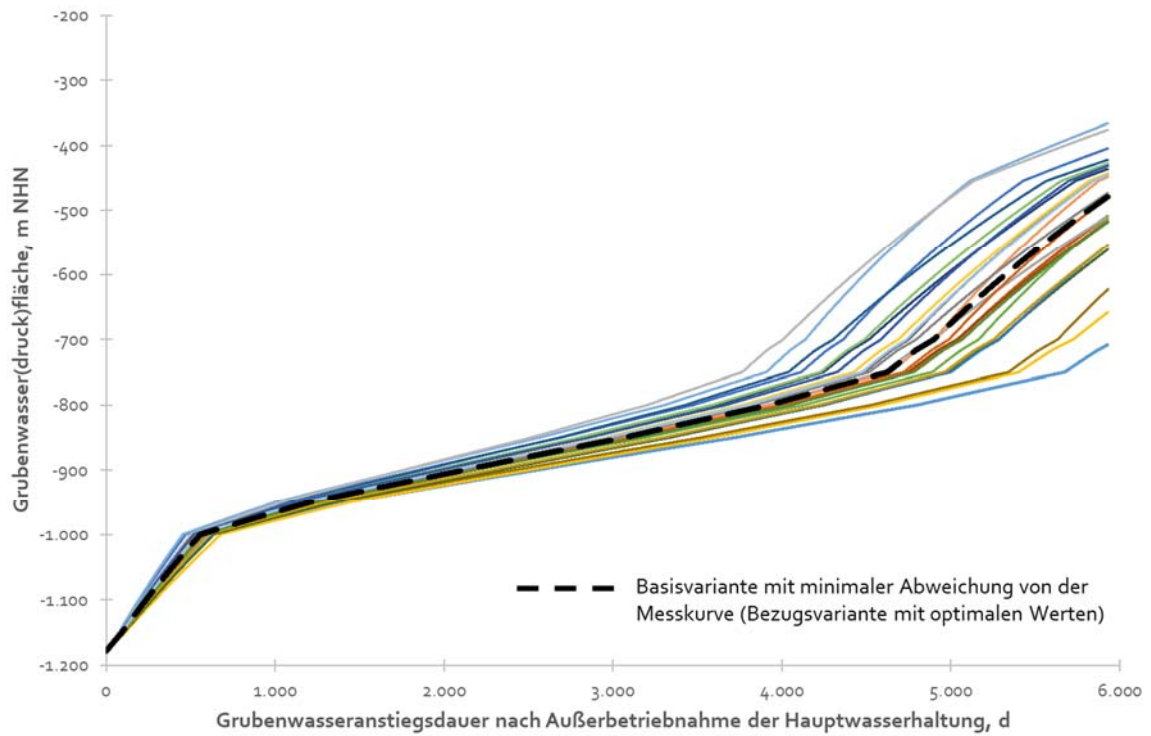
(\check{V}_{RHV} ; \check{l}_E ; \check{k}_F ; \check{h}_{Inf}) - : untere Stufe; + : obere Stufe; o : optimaler Wert





Modellierte Grubenwasseranstiegskurven am Beispiel des **Bergwerks Westfalen**.

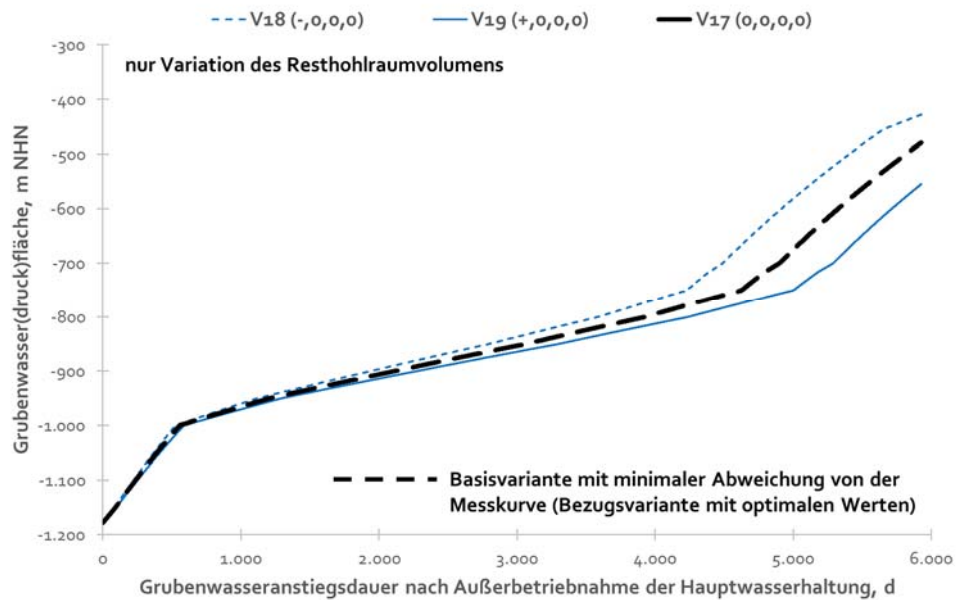
Gesamtübersicht aller Varianten

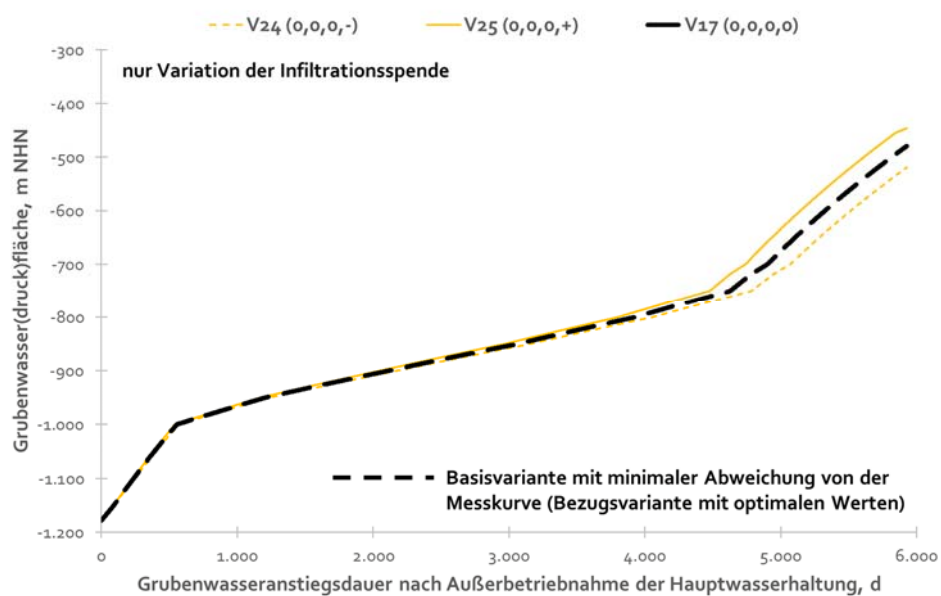
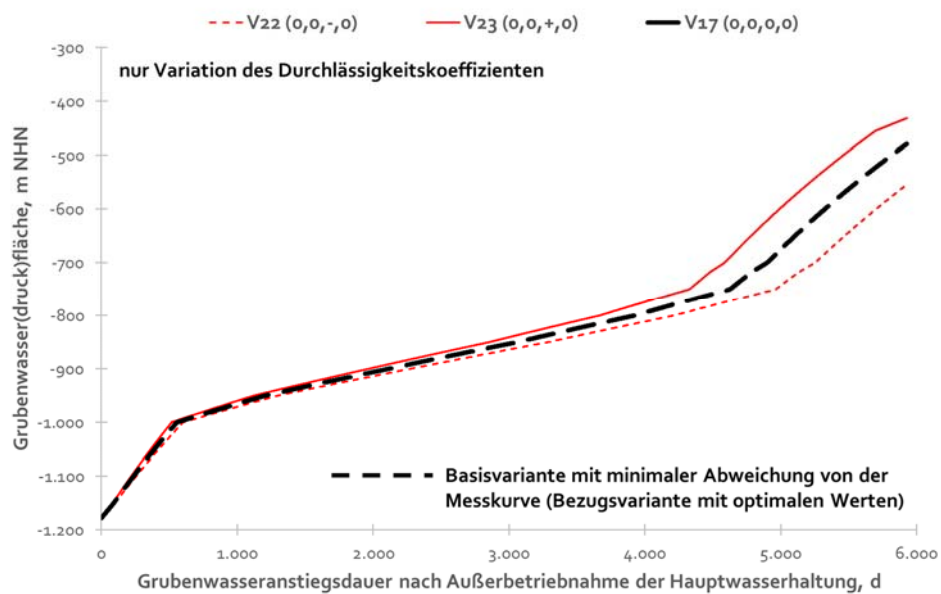
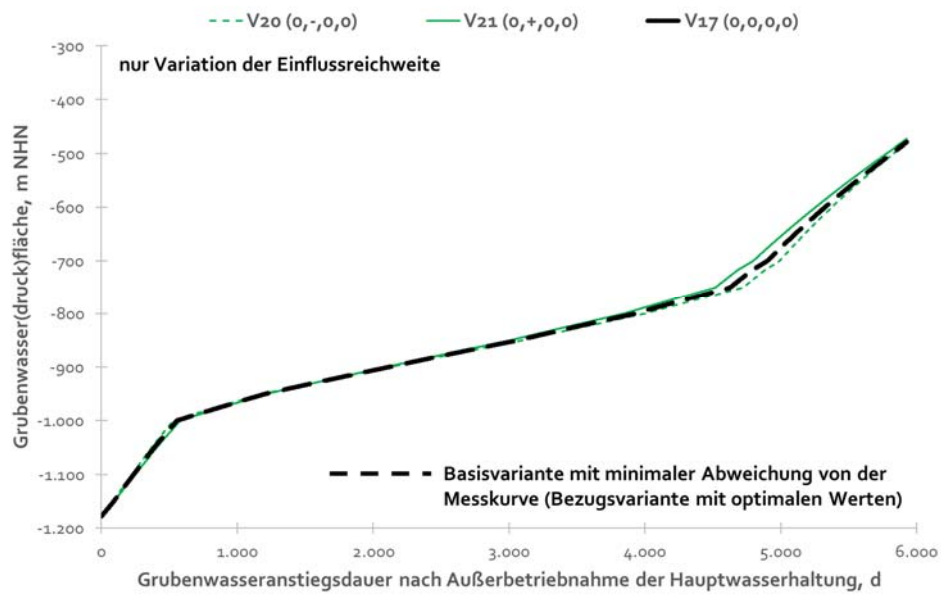


Variationen singularer Faktoren

Erläuterungen:

(\check{V}_{RHV} ; \check{l}_E ; \check{k}_f ; \check{h}_{Inf}) - : untere Stufe; + : obere Stufe; o : optimaler Wert





Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Sebastian Westermann
Geburtstag: 8. Februar 1983
Geburtsort: Rheda-Wiedenbrück
Staatsangehörigkeit: deutsch
Familienstand: verheiratet, zwei Kinder

Schulausbildung

1989–1994 Grundschule in Gütersloh
1994–2003 Evangelisch Stiftisches Gymnasium in Gütersloh

Berufsausbildung

2003–2004 Studium der naturwissenschaftlichen Informatik an der Universität Bielefeld
2004–2007 Studium der Geowissenschaften an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster; Abschluss: Bachelor of Science
2007–2009 Studium der Geowissenschaften an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster; Abschluss: Master of Science

Berufliche Tätigkeit

2010-2015 Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Ingenieurbüro Schmidt und Partner GmbH, Beratende Hydrogeologen BDG, Beratende Ingenieure VBI, Bielefeld
seit 2015 Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungszentrum Nachbergbau an der Technischen Hochschule Georg Agricola, Bochum.